

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI
INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.05/2025.27.12.T/FM.10.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI
M.T. O‘ROZBOYEV NOMIDAGI MEXANIKA VA INSHOOTLAR
SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI INSTITUTI**

RAVSHANOV SHOHJAXON AKMALJON O‘G‘LI

**SUV BILAN ISITISH TARMOQLARIDA ISSIQLIK VA MASSA
KO‘CHISHI JARAYONLARINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH**

01.02.05 – Suyuqlik va gaz mexanikasi

FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI

Toshkent – 2026

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)
Dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам**

**Contents of Dissertation Abstract of the Doctor of Philosophy (PhD)
on physical-mathematical Sciences**

Ravshanov Shohjaxon Akmaljon o'g'li

Suv bilan isitish tarmoqlarida issiqlik va massa ko'chishi jarayonlarini matematik
modellashtirish3

Равшанов Шохжахон Акмалжон угли

Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в водяных
отопительных сетях23

Ravshanov Shohjaxon Akmaljon o'g'li

Mathematical simulation of heat and mass transfer in water-based heating systems
.....43

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works46

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI
INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.05/2025.27.12.T/FM.10.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI M.T.
O‘ROZBOYEV NOMIDAGI MEXANIKA VA INSHOOTLAR
SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI INSTITUTI**

RAVSHANOV SHOHJAXON AKMALJON O‘G‘LI

**SUV BILAN ISITISH TARMOQLARIDA ISSIQLIK VA MASSA
KO‘CHISHI JARAYONLARINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH**

01.02.05 – Suyuqlik va gaz mexanikasi

FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI

Toshkent – 2026

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) Dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2026.1.PhD/FM1150 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi M.T.O'rozboyev nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) ilmiy kangash veb-sahifasida (<https://institutemechanics.uz>) va "Ziyonet" ta'lim-axborot portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Hamdamov Muzaffar Muhiddinovich
texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

Rasmiy opponentlar:

Maxmudov Jamol Maxmudovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Hojiyev Safar
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot:

**Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellekti
rivojlantirish ilmiy tadqiqot instituti**

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi M.T.O'rozboyev nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti huzuridagi DSc.05/2025.27.12.T/FM.10.01 raqamli ilmiy kengashning ____ yil __ - ____ sanasida soat ____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100125, Toshkent, Do'rmon yo'li ko'chasi, 40, 428-majlislar zali. Tel: (99855) 520-02-45; (9985) 520-04-46, e-mail: instmech@academy.uz).

Dissertatsiya bilan O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi M.T.O'rozboyev nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutining axborot-resurs markazida tanishish mumkin (____-raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100125, Toshkent sh., Do'rmon yo'li ko'chasi, 40-uy. Tel.: (99855) 520-02-45).

Dissertatsiya avtoreferati ____ yil «__» yanvar kuni tarqatildi.
(____ yil «__» ____ dagi ____ raqamli reyestr bayonnomasi)

M.M.Mirsaidov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
raisi, t. f. d., professor, O'zR FA
akademigi

F.F.Adilov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
ilmiy kotibi, PhD, k.i.x.

Z.M.Malikov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi, t.f.d.,
prof.

Kirish (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda energiya resurslaridan samarali foydalanish, issiqlik ta'minoti infratuzilmalarini modernizatsiya qilish hamda energiya tejamkor texnologiyalarni joriy etish eng muhim strategik masalalarni tashkil qiladi. Bugungi kunda raqamli iqtisodiyot va intellektual muhandislik tizimlari jadal rivojlanib borayotgan bir davrda, quvurlar orqali issiqlik va massa ko'chishi jarayonlarini matematik modellash va ularning gidrogazodinamik xarakteristikalarini optimallashtirish masalalariga alohida ahamiyat berilmoqda. Hozirgi kunda rivojlangan mamlakatlarda murakkab konfiguratsiyali quvurlarda va zamonaviy isitish radiatorlarida issiqlik tashuvchi suyuqlikning harakati hamda harorat tarqalishini aniq bashorat qilish, gidrodinamik yo'qotishlarni kamaytirish va tizimning umumiy samaradorligini oshirish bilan bog'liq masalalarni hal etish muhim ahamiyat kasb etmoqda. Bu borada, jumladan quvurlar tizimlarining har bir qismini masofadan turib issiqlik tarqalishi jarayonlarini nazorat qilish va boshqarish, shuningdek tizimning umumiy ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish hamda samaradorligini oshirishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda oquvchan muhitlarning quvurlar bo'ylab harakatini hamda turli sharoitlarda issiqlik tarqalishini o'rganuvchi matematik modellar va hisoblash usullarini takomillashtirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda, jumladan quvurlar tizimini loyihalash va boshqarish uchun aniq hisob-kitoblar hamda tizimdagi statsionar suyuqlik oqimi va issiqlik uzatilishi jarayonlari uchun ko'p variantli yechimlarni shakllantirish ustuvor ahamiyat kasb etmoqda. Shuningdek, kinetik energiya dissipatsiyasi, devor orqali issiqlik uzatilishi, quvurning boshlang'ich qismida laminar va turbulent oqimlarning shakllanishi kabi omillarni hisobga olib, jarayonni aniq modellash avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlari va gidravlik hisob-kitoblarda muhim o'rin tutadi. Shu bois, tashqi muhit ta'siri, murakkab quvur parametrlari va oqim rejimlarini to'liq ifodalovchi matematik modellar hamda yechish algoritmlarini ishlab chiqib, amaliy masalalarga qo'llash eng dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda bugungi kunda turar-joy binolarini samarali isitish tizimlarini yaratish, yangi texnologiyalarni joriy etish, mahsulotni iste'molchilarga kerakli miqdor va bosim intervallarida uzluksiz yetkazib berishni ta'minlash, shuningdek uzatish tizimlariga matematik modellash usullari hamda axborot-kommunikasiya texnologiyalarini keng qo'llashga qaratilgan ko'plab ilmiy-tadqiqotlar olib borilmoqda. «2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash hamda “Yashil iqtisodiyot” texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish»¹ bo'yicha vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda suv bilan isitish tizimlarida issiqlik va massa ko'chishi jarayonlarining real vaqtdagi

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son “2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida”gi Farmoni.

holatini ifodalovchi matematik modellar, sonli algoritmlar va dasturiy vositalarni ishlab chiqish borasida tadqiqotlar olib borish muhim hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi «2022-2026 yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida»gi PF-60-sonli Farmoni, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2008 yil 15 iyuldagi «Innovation loyihalar va texnologiyalarni ishlab chiqarishga tatbiq etishni rag'batlantirish borasidagi qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida»gi PQ-916-sonli va 2018 yil 27 apreldagi «Innovation g'oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliy joriy etish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida»gi PQ-3682-sonli qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarini rivojlanishining IV. «Matematika, mexanika, informatika» ustuvor yo'nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Quvurlardagi gidrodinamik va issiqlik almashinuvi jarayonlari gidromexanikaning fundamental yo'nalishlaridan biri bo'lib, L. Prandtl, T. Karman, G. Shlixting, I. Nikuradze va boshqalarning klassik tadqiqotlarida laminar va turbulent oqimlar, hamda chegaraviy qatlam nazariyasi asoslari yaratilgan. Turbulent oqimlarni modelashtirishda F. Menterning SST modeli hamda B. Launder va D. Spaldingning algoritmlari yuqori samaradorlik ko'rsatdi. Konvektiv issiqlik almashinuvini hisoblashda esa F. Dittus, L. Boelter, E. Sieder, G. Tate va V. Gnielinskilarning empirik korrelyatsiyalari hamon muhandislik hisoblarining asosi bo'lib kelmoqda. Shuningdek, silindrik quvurlardagi jarayonlar Graetz, Nusselt, Dean, Acrivos kabi ko'plab olimlar tomonidan chuqur o'rganilgan. Bugungi kunda tadqiqotlar quvur tarmoqlarining murakkab topologiyasi, tashqi muhit ta'siri hamda oqimning o'zgaruvchan rejimlarini hisobga olgan holda matematik modellarni takomillashtirish yo'nalishida jadal rivojlanmoqda.

O'zbekistonda ham bu yo'nalishlarda ilmiy maktablar shakllangan. Jumladan, U. Dalaboyev, N. Ravshanov, Z.M. Malikov, S. Xodjiyev, M.E. Madaliyev, F.X. Nazarov va boshqa olimlarning ilmiy ishlari natijasida kanallardagi turbulent oqimlarning matematik modellarini ishlab chiqish va sonli usullarni qo'llash bo'yicha muhim natijalarga erishilgan. Quvurlar tizimi faoliyati masalalarini o'rganish va amaliyotga joriy etishda respublikamizda J.F. Fayzullaev, R. Sadullaev, Q.Sh. Latipov, J. Akilov, B. Xo'jayorov, I.K. Xujaev, S.I. Xudoyqulov, K. Navruzov, A.A. Mirzoyev, J. Maxmudov, O.M. Arifjonov, A.M. Fatxullaev va boshqa bir qator olimlar ilmiy tadqiqotlar olib borishgan va ijobiy natijalarga erishishgan.

Shu bilan birga, atrof-muhit harorati va quvurlarning murakkab geometrik tuzilishini hisobga olgan holda issiqlik tarqalishi masalalarini zamonaviy turbulentlik modellari asosida modelashtirish va sonli tadqiq etish masalalari yetarli darajada o'rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan muassasaning ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi O'zR FA M.T. O'rozboyev nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutining «Suyuqlik, gaz va gidroyuritmalar tizimlari mexanikasi» laboratoriyasining 2022-2026 yillarga mo'ljallangan "Ko'p fazali muhitlar dinamikasini, tabiiy gazning yonish va transport qilish jarayonlarini matematik modellashtirish" mavzusidagi ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi quvurlar va isitish tizimlarida kechuvchi gidrotermik jarayonlarni tavsiflovchi matematik modellar va sonli usullarni yaratish va ularni turli oqim rejimlarida issiqlik va massa va issiqlik almashinuvi qonuniyatlarini tadqiq etishga qo'llashdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

quvurlardagi statsionar jarayonlar uchun massa, impuls va energiya saqlanish tenglamalariga asoslangan, gidrodinamik va issiqlik parametrlarini o'zaro bog'lovchi samarali kvazi bir o'lchovli matematik modelini ishlab chiqish;

quvurlarning boshlang'ich qismida noizotermik laminar oqimga mos matematik modellarni shakllantirish va ularni yechish uchun Simple usuli asosidagi sonli hisoblash usullarini yaratish;

zamonaviy SST $k - \omega$ turbulentlik modeli yordamida quvurning boshlang'ich qismidagi oqim kinetik energiyasi va dissipatsiya dinamikasini tadqiq etish, shuningdek, turbulent diffuziya hisobiga Nusselt sonining laminar rejimga nisbatan barqarorlashish qonuniyatlarini tahlil qilish;

zamonaviy isitish radiatorlarining 3D – modelini ishlab chiqish va uni issiqlik samaradorligini baholashda qo'llash;

ishlab chiqilgan matematik modellar va olingan sonli natijalarning adekvatligini klassik empirik formulalar va zamonaviy hisoblash gidrodinamikasi dasturlari natijalari bilan qiyosiy tahlil qilish orqali asoslash.

Tadqiqot ob'ekti sifatida diametri o'zgaruvchan va o'zgarmas quvurlarda issiqlik tashuvchi suyuqliklarning noizotermik harakati qaraldi.

Tadqiqot predmetini quvurlarning boshlang'ich va asosiy qismlarida kechadigan issiqlik va massa ko'chishi jarayonlarini o'rganish uchun matematik modellar hamda hisoblash algoritmlarini yaratish tashkil etadi.

Tadqiqot usullari. Tadqiqotni olib borish jarayonida matematik modellashtirish, sonli usullar, shuningdek axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining sonli natijalarni vizuallashtirish usullari qo'llanildi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy yangiligi:

diametri o'zgaruvchan quvurlarda suyuqlikning oqim tezligi, bosimi va haroratining yo'l-yo'lakay o'zgarishini tavsiflovchi kvazi bir o'lchovli statsionar model ishlab chiqilgan va sonli natijalar olingan;

o'qqa nisbatan simmetrik quvurning boshlang'ich qismi uchun suyuqlik dinamik yopishqoqligi, issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti va solishtirma issiqlik sig'imining haroratga bog'liq bo'lgan va bo'lmagan hollari uchun laminar oqim rejimiga mos matematik modellar hamda ularni yechish uchun SIMPLE usuli asosidagi sonli algoritmi ishlab chiqilgan;

turbulentlikning zamonaviy $k - \omega$ modeli asosida quvurning boshlang'ish noizotermik qismida turbulentlikning kinetik energiyasi va dissipatsiyasining dinamikasi tadqiq etildi hamda turbulent diffuziya hisobiga Nusselt sonining laminar rejimga nisbatan jadal barqarorlashishi isbotlangan;

yaratilgan suv bilan isitish tizimi zamonaviy radiatorining 3D-modeli suyuqlik oqimlarining seksiyalar bo'ylab notekis taqsimlanishi va tizimning samarasiz sohalarini aniqlash uchun qo'llanilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

atrof-muhit haroratini inobatga olgan holda issiqlik almashtirgichlarda energiya va bosim yo'qotishlarini bashoratlash algoritmi taklif etilgan;

oqimning laminar va turbulent rejimlarida atrof-muhit harorati hamda gidravlik parametrlar bog'liqligini hisobga oluvchi dasturiy majmua Python muhitida ishlab chiqildi hamda parallel hisoblash mexanizmlarini qo'llash hisobiga hisoblash vaqti 50 baravargacha qisqartirilgan;

murakkab ko'ndalang kesimli elementlarga ega suv bilan isitish radiatorlarini hisoblash algoritmi ishlab chiqildi va radiatorning geometrik parametrlarini optimallashtirish va issiqlik samaradorligini oshirish uchun asos yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalarining ishonchliligi ularning massa, impuls va energiya saqlanishi qonunlariga qat'iy mosligi, sonli yechim olishda zaruriy aniqlik, hisoblash jarayonining turg'unligi va yaqinlashuvchanligi ta'minlanganligi bilan, shuningdek natijalarning klassik empirik formulalarga (Blasius, Gnielinski, Sieder-Tate, Dittus-Boelter) mosligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati quvurlarda oqimning shakllanishi va issiqlik-massa ko'chishi jarayonlarining takomillashtirilgan kvazi bir o'lchovli va matematik modellarini ishlab chiqilganligi, termofizik parametrlar va geometrik shakllarning gidro-termik ko'rsatkichlarga ta'sir etish qonuniyatlari hamda barqarorlashish dinamikasi aniqlanganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati olingan yechimlar va hisoblash algoritmlaridan quvurlar va radiator tizimlaridagi issiqlik samaradorligini bashoratlash, gidravlik yo'qotishlar va "samarasiz sohalarini" optimallashtirish maqsadida foydalanish mumkinligi hamda bu maqsadga yo'naltirilgan Python/Comsol muhitidagi dasturiy mahsulotlar majmuasi yaratilganligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. "Suv bilan isitish tarmoqlaridagi issiqlik va massa ko'chishi jarayonlarini matematik modellashtirish" mavzusida olib borilgan tadqiqot natijalari asosida:

quvur tarmoqlarida issiqlik va massa ko'chishini ifodalovchi takomillashtirilgan matematik model va hisoblash algoritmlari "Buxoro suv ta'minoti" AJ ob'ektlariga joriy etilgan ("Buxoro suv ta'minoti" AJning 01.03.2026 yildaga dalolatnomasi). Natijada markaziy suv ta'minoti quvurlarida yuzaga kelishi mumkin bo'lgan nosozliklarni (avariya holatlarini) oldindan bashorat qilish imkoniyati yaratilgan bo'lib, tizimdagi bosim yo'qotishlarini 3–4 %, issiqlik

yo‘qotishlarini 4–5 % kamaytirishga hamda tizimning umumiy samaradorligini 4–5 % oshirishga erishilgan;

o‘zgaruvchan kesimli quvurlarda issiqlik-massa ko‘chishi jarayonlarini hisoblash uchun ishlab chiqilgan dasturiy ta‘minot “Buxoro suv ta‘minoti” AJ faoliyatiga joriy etilgan (“Buxoro suv ta‘minoti” AJning 06.03.2026 yildagi №383-sonli ma‘lumotnomasi). Natijada o‘zgaruvchan diametrli va murakkab relyefli quvur tizimlarini loyihalashda gidravlik va issiqlik parametrlarini aniqlash jarayoni avtomatlashtirilgan hamda taklif etilgan kvazi bir o‘lchovli yondashuv hisobiga hisoblash vaqtini 5-10 foizga qisqartirish imkoniyati yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobsatsiyasi. Tadqiqot natijalari 2 ta xalqaro va 2 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 18 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 11 ta ilmiy maqola chop etilgan, jumladan 7 ta respublika va 4 ta xorijiy va Scopus ba‘zasiga kiritilgan jurnallarda chop etilgan hamda EHM uchun 3 ta dasturiy mahsulotga Intellektual mulk agentligining guvohnomalari olingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 120 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning kirish qismida dissertatsiya mavzusining O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga mos kelishi, dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqotning ob‘ekti va predmeti ko‘rsatib berilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan va nazariy hamda amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalari amaliyotga joriy etilganligi, chop etilgan ishlar va dissertatsiya ishining tuzilishi haqida ma‘lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning birinchi bobida «**Oqimlar hamda issiqlik va massa ko‘chishi jarayonlarini modellashtirishning nazariy asoslari**» bayon etilgan.

§1.1 da suyuqlik harakatining laminar va turbulent rejimlarini modellashtirishning nazariy asoslari tahlil qilingan. Uzluksizlik va harakat tenglamalari tizimi sifatida fundamental Navye-Stoks tenglamalarining turli ko‘rinishlari ko‘rib chiqilgan. Oqim xarakterini aniqlashda Reynolds sonining ahamiyati, shuningdek, tezlik profilining shakllanishi va chegara qatlaminig barqarorligiga bosim gradiyentining ta'siri ko‘rib chiqilgan.

§1.2 da issiqlik va massa almashinuvi jarayonlarini modellashtirishning nazariy yondashuvlari keltirilgan. Energiya saqlanish qonunlari asosida issiqlik o‘tkazuvchanlik, konveksiya va nurlanish ning matematik ifodalari bayon qilingan. Furye qonuni, Maksvell–Kattaneo–Likovning giperbolik issiqlik o‘tkazuvchanlik

tenglamalari, shuningdek, lokal-muvozanatsiz jarayonlarni tavsiflash uchun ularning turli koordinatalar tizimlaridagi ifodalari ko‘rib chiqilgan.

§1.3 da gidrotermik masalalarni yechishning sonli usullari tavsiflangan. Quvurlardagi oqimlarni hisoblashda chekli hajmi usuli, chekli elementlar usuli va chekli ayirmalar usulini qo‘llash xususiyatlari muhokama qilingan. Bosim va tezlikni bog‘lash uchun SIMPLE algoritmgiga, turbulentlikning zamonaviy modellariga, shuningdek, Pismen-Rekfordning oshkormas sxemasiga alohida e‘tibor qaratilgan. Mavjud usullar va yondashuvlarning o‘tkazilgan tahlili mavzuning dolzarbligini asoslashga hamda mazkur tadqiqotning maqsad va vazifalarini shakllantirishga imkon berdi.

Ishning ikkinchi bobi «**O‘zgaruvchan diametrli relyefli quvurlarda issiqlik va massa ko‘chishini matematik va sonli modellash**» deb nomlandi.

§2.1 da suv bilan isitish tizimi quvuridagi issiqlik va massa ko‘chish jarayonlarining kvazibir o‘lchamli matematik va sonli modellari taklif etilgan. Model doirasida issiqlik tashuvchi suyuqlikning real xususiyatlari hajmiy siqilish koeffitsiyenti va o‘zgaruvchan solishtirma issiqlik sig‘imi orqali hisobga olingan. O‘zgarmas va o‘zgaruvchan diametrga ega quvuro‘tkazgichning elementar relyefli qismidagi real suyuqlikning statsionar noizotermik holati masalasi ko‘rib chiqilgan.

Kirish ma‘lumotlari sifatida suyuqlik bosimi, oqim tezligi va harorati qiymatlari, shuningdek, uchastkaning geometrik ko‘rsatkichlari (uzunligi L , ichki diametri $D(x)$, devor qalinligi h) berilgan. Impulsning saqlanish tenglamasida trassa profili $z(x)$ va qiyalik hisobga olingan. Hisob ishlarida gidravlik qarshilik koeffitsiyenti uchun rivojlangan turbulent rejimga mos Blazius formulasidan foydalangan:

$$\lambda(x) = 0.11(k_{\text{экс}} / D(x))^{0.25}. \quad (1)$$

Quvurning konstruktiv parametrlari, atrof-muhit parametrlari hamda obyektning issiqlik-fizik ko‘rsatkichlarini o‘zgartirish orqali olingan natijalarning kompleks tahlili o‘tkazildi, bu esa turli ekspluatatsiya sharoitlarida tizim holati o‘zgarishining qonuniyatlarini aniqlash imkonini berdi.

Quvurdagi suyuqlikning noizotermik holati massa, impuls va ichki energiyaning saqlanishining kvazibir o‘lchamli tenglamalari orqali tavsiflandi:

$$\begin{cases} f \rho u = M = \text{const}, \\ M \frac{du}{dx} + f \frac{dp}{dx} + \frac{\lambda}{2D} M |u| + f \rho g \sin \alpha = 0, \\ M \frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{\lambda}{2D} M u |u| - k_{cp} \bar{f}_{op} (T - T_{oc}). \end{cases} \quad (2)$$

Bu yerda $\rho(x)$, $u(x)$, $p(x)$, $T(x)$ – x kesimdagi suyuqlik zichligi, tezligi, bosimi va mutlaq haroratining o‘rtacha qiymatlari (kg / m^3 , m / s , Pa , K);
 $f(x) = \pi D^2(x) / 4$ – quvuro‘tkazgichning ko‘ndalang kesim yuzi (m^2);

$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ – erkin tushish tezlanishi; $\varepsilon = c_B T$ – suyuqlikning ichki energiyasi (J/kg); $c_B = (a + bT + c'/T^2)/\mu$ – suyuqlikning solishtirma issiqlik sig‘imi ($J/kg/K$); μ – suyuqlikning molyar massasi (kg/mol); k_{cp} – quvur devorlari va izolyatsiya orqali suyuqlikdan atrof-muhitga tabiiy konveksiyani hisobga olgan holda issiqlik berish koeffitsiyenti [$J/(m^2 s K)$]; $\bar{f}_{op}(x) = \pi(D(x) + 2\delta)$ – quvuro‘tkazgichning 1 metr ga to‘g‘ri keluvchi tashqi sirt yuzasi (m); δ – quvur devori qalinligi (m); $T_{oc}(x)$ – atrof-muhit harorati (K).

Hisoblashlarda suv uchun quyidagi formuladan foydalanildi:

$$c_B(T) = 39.02 + 0.07664T + 1196000/T^2 \text{ [} J \text{ mol}^{-1} K^{-1} \text{]}. \quad (3)$$

Bosim va zichlik orasidagi bog‘liqlik, ularning ma‘lum xarakterli p_* , ρ_* , qiymatlarida, suyuqlikning elastiklik moduli k orqali ifodalandi:

$$p - p_* = \frac{k}{\rho_*}(\rho - \rho_*). \quad (4)$$

$p_\Delta = p_* - k$, $c^2 = k/\rho_*$ belgilashlarini kiritib va tizimning ikkinchi tenglamasi tarkibiy qismlarini bosim orqali ifodalab, $M \geq 0$ bo‘lganda quyidagi differensial tenglama tuzildi:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\left(\frac{M^2 c^2}{f^2(p - p_\Delta)} \right) \frac{df}{dx} - \frac{\lambda}{2D} \frac{M^2 c^2}{f(p - p_\Delta)} - f \frac{p - p_\Delta}{c^2} g \sin \alpha}{f \left(1 - \frac{M^2 c^2}{f^2(p - p_\Delta)^2} \right)}. \quad (5)$$

$M = 0$ $\kappa z/c$ da tenglama quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho g \sin \alpha, \quad (6)$$

bu tenglama suyuqlikning yuqori qatlamlari bosimi ostida uning hajmiy siqilishiga muvofiq, tinch holatdagi qismda o‘ziga xos barometrik bosim taqsimotini beradi:

$$p(x) = p_\Delta + (p_0 - p_\Delta) e^{-\frac{g}{zRT}[y(x) - y(0)]} \quad (7)$$

Δx integrallash qadami qiymatida keyingi hisoblash nuqtasidagi bosim qiymati (5) ga muvofiq quyidagi formula bo‘yicha hisoblandi:

$$p_{i+1} = p_i + \Delta x \frac{\left(\frac{M^2 c^2}{f_i^2(p_i - p_\Delta)} \right) \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} - \frac{\lambda_i}{2D_i} \frac{M^2 c^2}{f_i(p_i - p_\Delta)} - f_i \frac{p_i - p_\Delta}{c^2} g \sin \alpha}{f_i \left(1 - \frac{M^2 c^2}{f_i^2(p_i - p_\Delta)^2} \right)}. \quad (8)$$

Umumiy uzunligi 1000 m bo'lgan qism uchun 1 m qadam bilan sonli integrallash usulini aprobatiya qilish yaxshi natija berdi. Bosimni (8) natijalari bilan taqqoslash 0.1 Pa dan oshmaydigan og'ishni ko'rsatdi (nisbiy xatolik 10^{-6} dan oshmaydi).

Bosimning ma'lum $p(x)$ qiymatida suyuqlikning zichligi va tezligi quyidagi formulalar bo'yicha aniqlandi:

$$\rho = \frac{p - p_{\Delta}}{c^2}, \quad (9)$$

$$u = \frac{M c^2}{f(p - p_{\Delta})} \quad (10)$$

Tashilayotgan suyuqlikning ichki energiyasi taqsimoti (2) sistemaning uchinchi tenglamasini $\varepsilon(0) = c_B(T_0)T_0$ shartda yechish orqali aniqlandi. (2) sistemaning uchinchi tenglamasini quyidagicha ifodalab:

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{\lambda}{2D} \frac{M^3 c^4}{f^2(p - p_{\Delta})^2} - \frac{k_{cp} \bar{f}_{op}}{M} (T - T_{oc}). \quad (11)$$

rekurrent munosabat tuzildi:

$$\varepsilon_{i+1} = \varepsilon_i + \Delta x \left(\frac{\lambda_i}{2D_i} \frac{M^3 c^4}{f_i^2(p_i - p_{\Delta})^2} - \frac{k_{cp} \bar{f}_{op}}{M} (T_i - T_{oc}) \right). \quad (12)$$

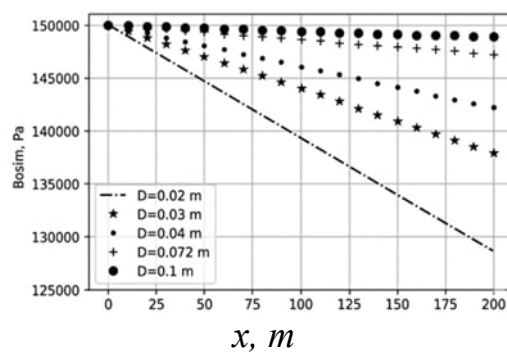
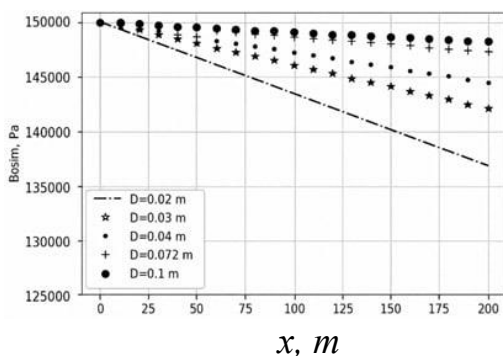
ε_{i+1} dan T_{i+1} haroratga teskari o'tish haroratga nisbatan:

$$\left(39.02 + 0.07664 T_{i+1} + 1196000 / (T_{i+1})^2 \right) T_{i+1} - \mu \varepsilon_{i+1} = 0 \quad (13)$$

kubik tenglamani kesmani teng ikkiga bo'lish usuli bo'yicha (dasturda shartning 10^{-10} aniqlik bilan qat'iy bajarilishi ta'minlangan) yechish orqali amalga oshirildi. Keyingi tugun uchun olingan qiymat T_{i+1} sifatida foydalaniladi.

§2.2 Gorizontaal va qiya quvurlar bo'ylab bosim tushishi va harorat o'zgarishi qonuniyatlari ularning geometrik va ekspluatatsion parametrlariga bog'liq holda o'rganildi. Turli qiyalik burchaklarida gravitatsiya kuchining oqimning energetik rejimiga ta'siri tahlil qilindi.

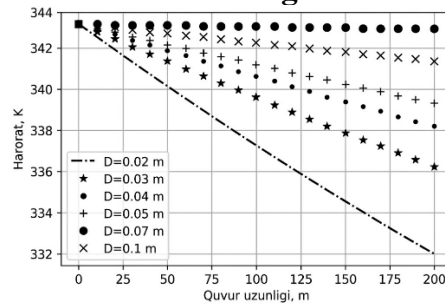
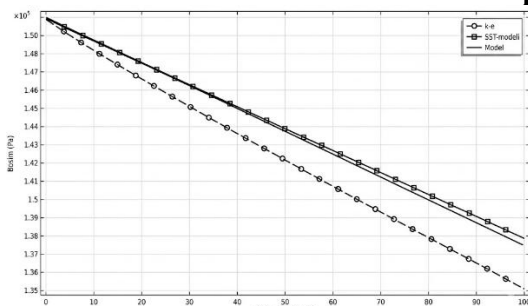
Hisoblashlar diametri $D = 0.1$ m bo'lgan quvurlar uchun, ekvivalent g'adirbudurligi 0.1 mm ni hisobga olgan holda, boshlang'ich tezlik $u_0 = 1$ m/s va bosim $p_0 = 1.5$ MPa bo'lganda amalga oshirilgan. Issiqlik almashinuvini tadqiq qilish doirasida devor qalinligining turli qiymatlarida ($h = 5, 8, 10$ mm) va atrof-muhit harorati o'zgarishida energiya yo'qotishlari baholangan. Sonli natijalar asosida harorat gradiyentlari aniqlangan va issiqlik yo'qotishlarining tizimning umumlashtirilgan issiqlik berish koeffitsiyentiga bog'liqligi o'rnatilgan.



$$\sin a = 0, k_{\text{экг}} = 0.0001 \text{ m}, u = 0.3 \text{ m/s}$$

$$\sin a = -0.001, k_{\text{экг}} = 0.001 \text{ m}, u = 0.3 \text{ m/s}$$

1-rasm. Turli diametrli quvurlarda bosim bosim o'zgarishi.



2-rasm. Zamonaviy turbulentlik modellari $k-\varepsilon$ va $k-\omega$ bilan solishtirish.

$$\sin a = 0, D = 0.03 \text{ m},$$

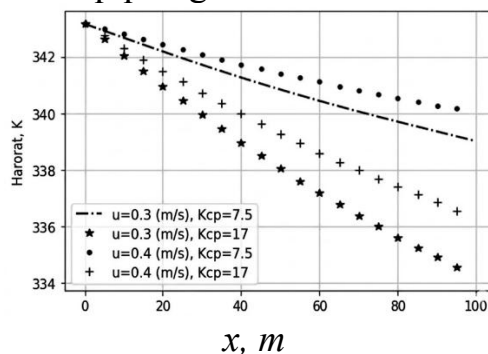
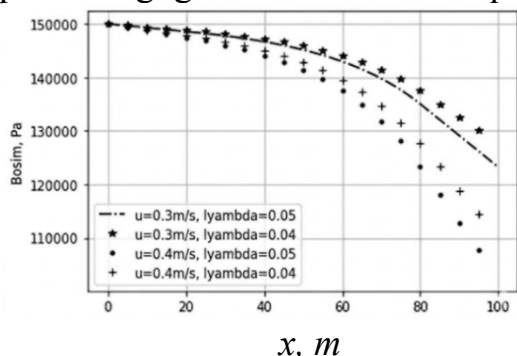
$$u = 0.4 \text{ m/s}, k_{\text{экг}} = 0.001 \text{ m}$$

3-rasm. Turli diametrli quvurlarda harorat o'zgarishi.

$$\delta = 0.005 \text{ m}, L = 200 \text{ m}, \mu = 0.001 \text{ Pa s},$$

$$k_{cp} = 7.5 \text{ J/(m}^2 \text{ s K)}, T_{oc} = 293.15 \text{ K}$$

§2.3 da ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan bo'lgan quvurlardagi, jumladan, diametri chiziqli (konfuzor va diffuzorli) hamda sakrash (to'satdan) o'zgaradigan qismlardagi gidrodinamik va issiqlik jarayonlari tadqiq etilgan.

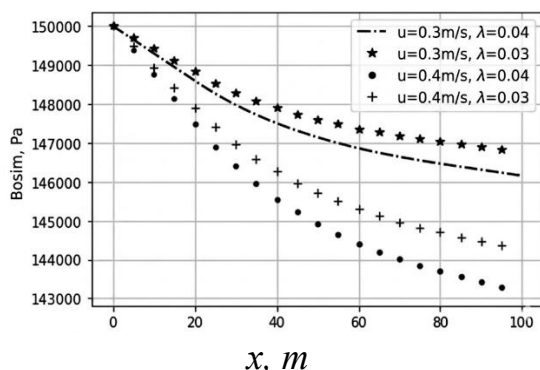


4-rasm. Konfuzor quvurda bosim o'zgarishi

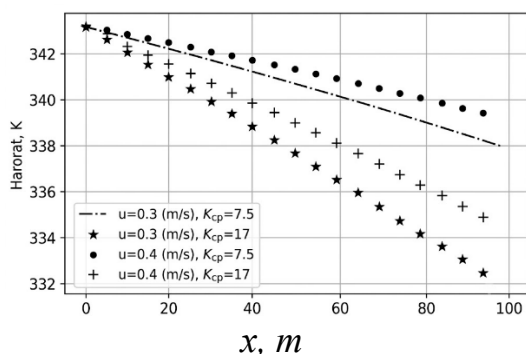
5-rasm. Konfuzor quvurda harorat o'zgarishi

O'tish kesimining torayishi statik bosimning keskin pasayishiga hamda oqimning tezlashishi va devorlar bilan kontakt vaqtining qisqarishi hisobiga issiqlik tashuvchi harorati pasayishining sekinlashishiga olib kelishi aniqlangan (4-5-rasmlar). Quvurning kengayishi esa, aksincha, bosimning tiklanishi va tezlikning pasayishi hamda tranzit vaqtining ortishi sababli suyuqlikning tezroq sovishi bilan kichadi (6-7-rasmlar). Quvur geometriyasining to'satdan o'zgarishida mahalliy gidravlik qarshiliklar hamda oqimning kinetik va potensial energiyalarining o'zaro o'tishi bilan bog'liq bo'lgan kritik bosim sakrashlari aniqlangan. Shuningdek,

suyuqlikning yuqori haroratli tashqi muhit tomonidan qizdirilish jarayoni tahlil qilingan bo'lib, uning natijalari issiqlik almashinuvini maksimal darajada jadallashtirish uchun yuqori issiqlik o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan kichik diametrli yupqa devorli quvurlarni qo'llash eng samarali ekanligini isbotladi.



6-rasm. Diffuzor quvurda bosim o'zgarishi

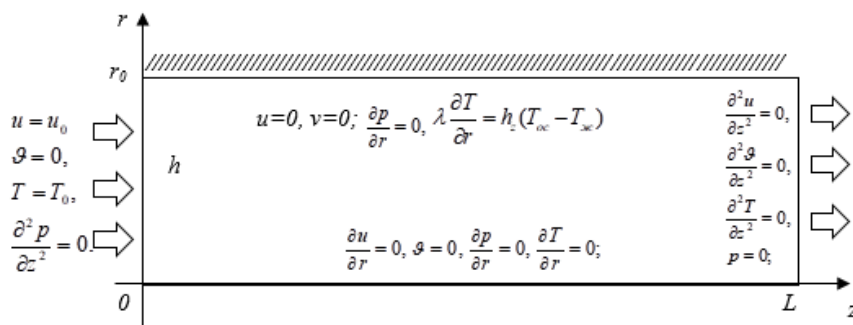


7-rasm. Diffuzor quvurda harorat o'zgarishi

Modellashtirish natijalari turli iqlim sharoitlari va obyektlarning konstruktiv xususiyatlarida isitish tizimlari elementlarining energetik samaradorligini bashoratlash imkonini beradi.

Dissertatsiyaning uchinchi bobi «**Laminar oqim rejimida silindrik quvurning boshlang'ich qismida issiqlik va massa almashinuvi jarayonlarini matematik modellashtirish**» deb nomlandi.

§3.1 da silindrik quvurning boshlang'ich qismida issiqlik va massa ko'chishi jarayonlari uchun masala qo'yilishi (8-rasm) va matematik modeli keltirilgan. Soddalashtirilgan kvazibir o'lchovli yondashuvlardan farqli o'laroq, bir jinsli kirish profillarining qayta shakllanishida Puazeyl oqimi va harorat maydonining hosil bo'lish mexanizmi o'rganilgan. Matematik apparat silindrik koordinatalardagi Navye–Stoks tenglamalari va energiya tenglamasi asosida qurilgan. Modelni amalga oshirish uchun muhitning o'zgarmas va o'zgaruvchan issiqlik-fizik xossalari (qovushqoqlik koeffitsienti μ , izobarik issiqlik sig'imi c_p , issiqlik o'tkazuvchanlik λ) ning oqim tuzilishiga va uning barqarorlashuvigacha bo'lgan ta'sirini batafsil o'rganish imkonini beruvchi SIMPLE algoritimga asoslangan sonli usul taklif etilgan.



8-rasm. Masalaning geometrik va chegaraviy shartlari

Masala ikki koordinata bo'ylab o'zgaruvchi kattaliklarda massa, impuls va issiqlik miqdorining saqlanishi tenglamalarini jalb etib yechildi:

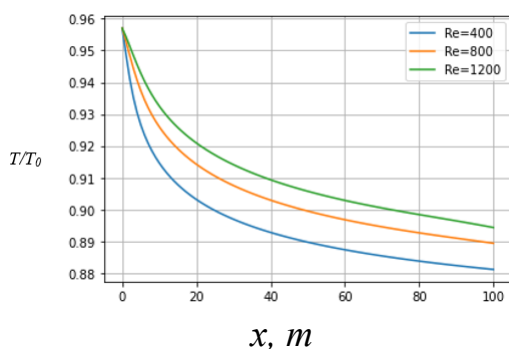
$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial(r\bar{g})}{\partial r} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{\mu} r \frac{\partial\bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{\mu} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} \right) \right), \\ \frac{\partial\bar{g}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{g}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{g}}{\partial z} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\mu} \frac{\partial\bar{g}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{\mu} \frac{\partial\bar{g}}{\partial z} \right) - \bar{\mu} \frac{\bar{g}}{r^2} \right), \\ \frac{\partial\bar{T}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{T}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{T}}{\partial z} = \frac{1}{\text{RePr} C_v(T)} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{a} \frac{\partial\bar{T}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{a} \frac{\partial\bar{T}}{\partial z} \right) \right). \end{cases} \quad (14)$$

Bu yerda: $\bar{a} = \lambda(T)\bar{\mu}$; $\bar{\mu} = \frac{\mu(T)}{\mu_*}$; μ_* – xarakterli dinamik qovushoqlik.

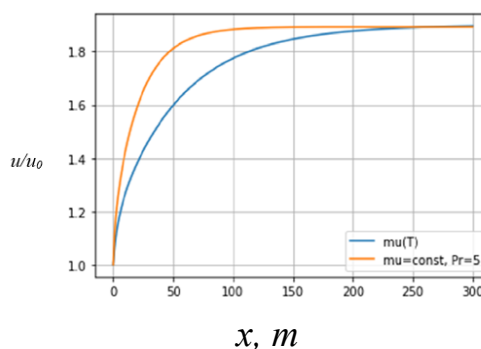
Suyuqlik dinamik qovushoqligining o'zgarishini tavsiflash uchun $\mu(T) = 2.414 \times 10^{\frac{247.8}{T-140}-5}$, solishtirma issiqlik sig'imi uchun $C_v(T) = 4180 + 3.1(T-20)$, issiqlik uzatish koefitsienti uchun $\lambda(T) = 0.561 + 0.0019T$ formulalardan foydalanildi

§3.2 da silindrik kanalning boshlang'ich qismidagi holatni o'rganishda foydalanilgan, SIMPLE usuli asosidagi o'lchamsiz Navye-Stoks tenglamalari tizimini yechishning sonli algoritmi ishlab chiqilgan. Hisoblash jarayoni qat'iy ravishda ikki bosqichga bo'lingan, dastlab bir o'lchamli radial haydash (progonka) usuli yordamida gidrodinamik masala yechildi (tezlik va bosim maydonlari aniqlanadi), shundan so'ng olingan ma'lumotlar asosida harorat maydoni hisoblanadi.

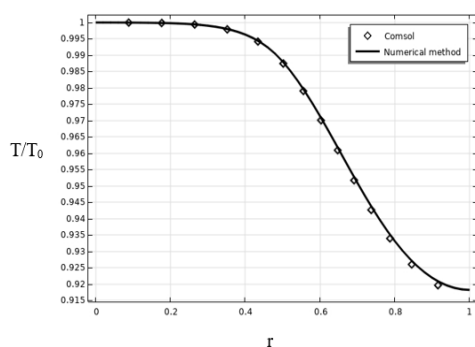
§3.3 da Python muhiti negizida dasturiy mahsulot ishlab chiqilgan va sonli hisoblash natijalari tahlili o'tkazilgan. Hisoblashlar quvurning o'zgaruvchan uzunligi, berilgan Reynolds va Prandtl sonlari, shuningdek, suyuqlik (suv) va quvur devori materiali (alyuminiy)ning issiqlik-fizik xususiyatlarini hisobga olgan holda amalga oshirilgan. Olingan gidrodinamik ma'lumotlar asosida ichki va tashqi Nusselt sonlari hisoblangan, shuningdek, issiqlik tashuvchidan atrof-muhitga uzatilishi issiqlikning umumiy koefitsiyenti va hajmi aniqlangan.



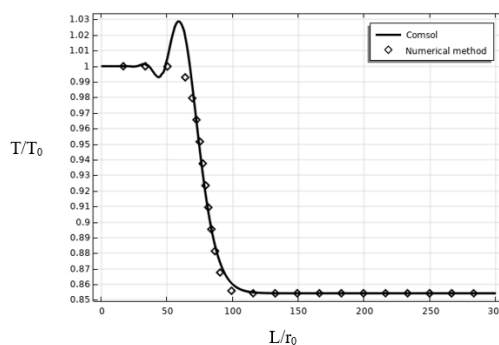
9-rasm. Turli Re sonlarida devordagi harorat o'zgarishi. $Pr=5$



10-rasm. O'qdagi tezlik profili $Re = 400$, $\mu = const$ va $\mu(t)$



11-rasm. Radial o'qdagi harorat tarqalishini Comsol Multiphysics dasturi bilan solishtirish



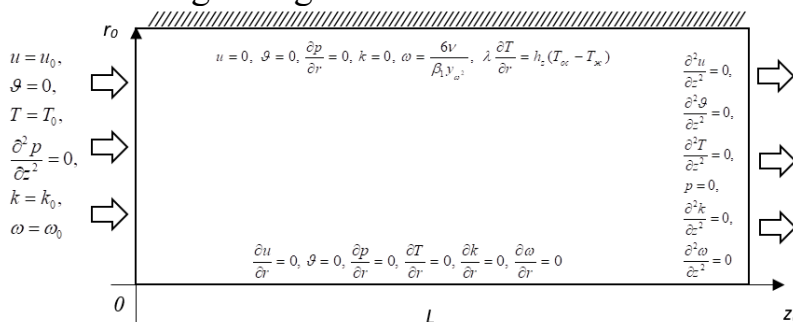
12-rasm. O'qdagi harorat tarqalishini Comsol Multiphysics dasturi bilan solishtirish

Reynolds sonining ortishi bilan issiqlik berish intensivligi oshishi aniqlandi (9-rasm). Dinamik qovushqoqlikning laminar tashkil etuvchisi haroratga bog'liq bo'lmagan holatda o'zgaruvchan tezlik profillarining o'q bo'yicha maksimal qiymatga intilishi jadal kechdi (10-rasm). Harorat profillarining Comsol Multiphysics natijalari bilan yaxshi mos kelishi ta'minlandi (11-rasm). 12-rasmdan ko'rinib turibdiki, Comsol Multiphysics natijalari harorat gradiyenti yuqori bo'lgan kesimlarda kichik ossillatsiyalarni (tebranishlarni) namoyon etdi.

Shunday qilib, modelning ishonchliligi kompleks verifikatsiya orqali tasdiqlandi. Hisoblash natijalari ham COMSOL Multiphysics va ANSYS Fluent dasturiy majmualari ma'lumotlari bilan va klassik empirik formulalar (Puazeyl va Nusselt) bilan yuqori darajadagi yaqinlikni ko'rsatdi. Matematik model va sonli algoritmdan oqimning laminar rejimida gidrodinamik va issiqlik tarqalish jarayonlarini tavsiflashda foydalanish mumkin.

Dissertatsiyaning to'rtinchi bobi «**Gorizontaal silindrik quvurlar va radiatorlardagi turbulent oqimda issiqlik va massa ko'chishi jarayonlarini matematik modellash**» amalga oshirilgan.

§4.1 da gorizontaal silindrik quvurning boshlang'ich qismida turbulent oqim rejimida issiqlik va massa ko'chish jarayonlarining matematik qo'yilishi shakllantirilgan. Silindrik koordinatalar tizimidagi hisoblash sohasi tavsiflangan va tegishli shartlar berilgan (13-rasm). Xususan, kirish qismida tezlik, harorat va turbulentlik parametrlari (kinetik energiya va solishtirma dissipatsiya tezligi) qiymatlari berilgan, quvur devorida esa yopishish shartlari, SST $k - \omega$ turbulentlik modelining devoroldi parametrlari belgilangan va atrof-muhit bilan konvektiv issiqlik almashinuvi hisobga olingan.



13-rasm. Hisoblash sohasining geometrik sxemasi

Substansiyalar ko‘chishi saqlanishi tenglamalari o‘lchovsiz ko‘rinishda olindi:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial(r\bar{g})}{\partial r} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) r \frac{\partial\bar{u}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} \right], \\ \frac{\partial\bar{g}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{g}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{g}}{\partial z} &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) r \frac{\partial\bar{g}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) \frac{\partial\bar{g}}{\partial z} \right] - \left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) \frac{\bar{g}}{r^2}, \\ \frac{\partial\bar{k}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{k}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{k}}{\partial z} &= P_k - \beta_0^* \bar{\omega} \bar{k} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{\sigma}_k \bar{v}_t \right) r \frac{\partial\bar{k}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{\sigma}_k \bar{v}_t \right) \frac{\partial\bar{k}}{\partial z} \right], \\ \frac{\partial\bar{\omega}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{\omega}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{\omega}}{\partial z} &= \bar{\alpha} \frac{\bar{\omega}}{\bar{k}} P_k - \beta_0 \bar{\omega}^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{\sigma}_\omega \bar{v}_t \right) r \frac{\partial\bar{\omega}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{\sigma}_\omega \bar{v}_t \right) \frac{\partial\bar{\omega}}{\partial z} \right], \\ c_v(\bar{T}) \left(\frac{\partial\bar{T}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{T}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{T}}{\partial z} \right) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{1}{\text{RePr}(\bar{T})} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{\partial\bar{T}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{RePr}(\bar{T})} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{\partial\bar{T}}{\partial z} \right]. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Suyuqlik dinamik qovushqoqligining o'zgarishini tavsiflash uchun

$$\mu(T) = 2.414 \times 10^{\frac{247.8}{T-140}-5}, \quad \text{solishtirma issiqlik sig'imi uchun}$$

$$C_v(T) = 4180 + 3.1(T - 20), \quad \text{issiqlik uzatish koeffitsienti uchun}$$

$$\lambda(T) = 0.561 + 0.0019T \quad \text{formuladan foydalanildi.}$$

Qo'shimcha ravishda quyidagi bog'liqliklar hisobga olindi:

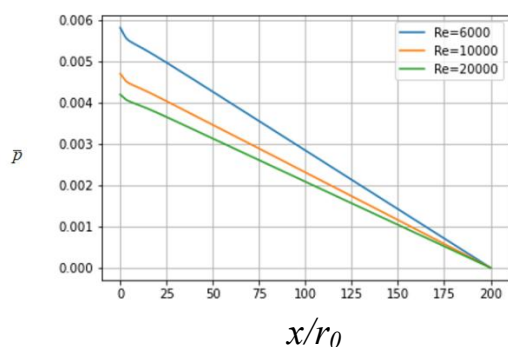
$$\nu_t = \frac{k}{\omega}, \quad P_k = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 \right],$$

$$\alpha = \frac{13}{25}, \quad \sigma_k^* = \frac{1}{2}, \quad \sigma_\omega = \frac{1}{2}, \quad \beta_0 = \beta_0^* = \frac{9}{125}, \quad \text{Pr}_t \approx 0.85, \quad \text{Pr}(\bar{T}) = \frac{\mu(T)c_v(T)}{\lambda(T)}.$$

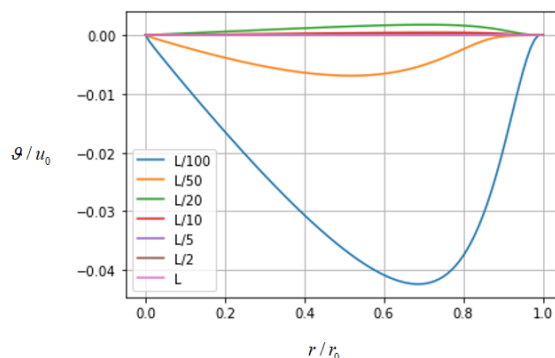
Masalani yechish uchun avvalgi bobda tavsiflangan sonli usul va algoritmdan foydalanildi. Bunda: SST $k - \omega$ modeliga muvofiq substansiyalarning turbulent ko'chish koeffitsiyentlarining o'zgaruvchanligi, SST $k - \omega$ modelining o'zi hamda o'zgaruvchan haroratga bog'liq holda laminar ko'chish koeffitsiyentlari hisobga olindi.

§4.2 da Python muhitida o'tkazilgan sonli tajriba natijalari tahlil qilingan va $\text{Re}=6000-15000$ qiymatlarida quvurning boshlang'ich qismida turbulent oqim shakllanishining o'ziga xos xususiyatlari aniqlangan.

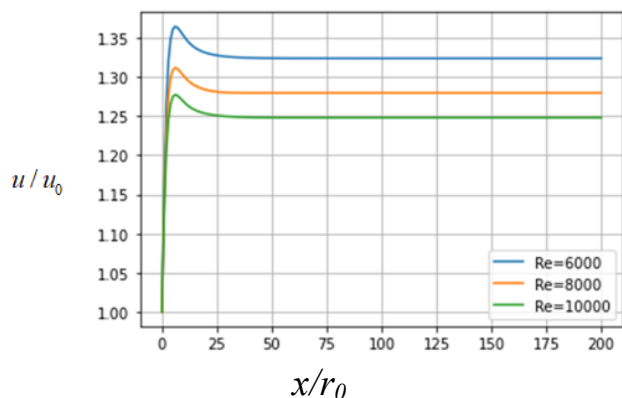
Boshlang'ich qism uzunligi bo'ylab bosim grafiklari (14-rasm) laminar oqim rejimida olingan natijalarga o'xshash ekanligi ma'lum bo'ldi.



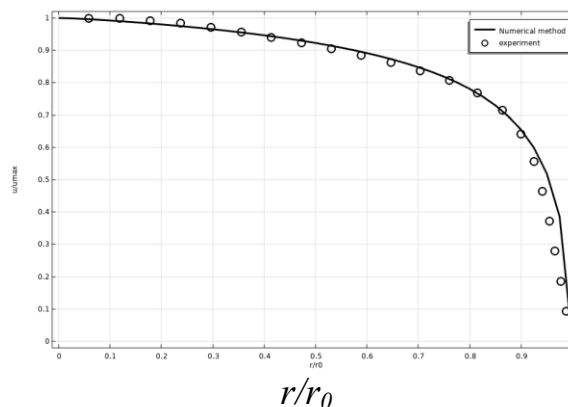
14-rasm. Turli Re sonlarida oqim o'qi bo'ylab bosimning tushishi



15-rasm. Quvur uzunligining turli kesimlarida radial tezlik garfiklari



16-rasm. Turli Re sonlarida o'qdagi oqim tezligining o'zgarishi



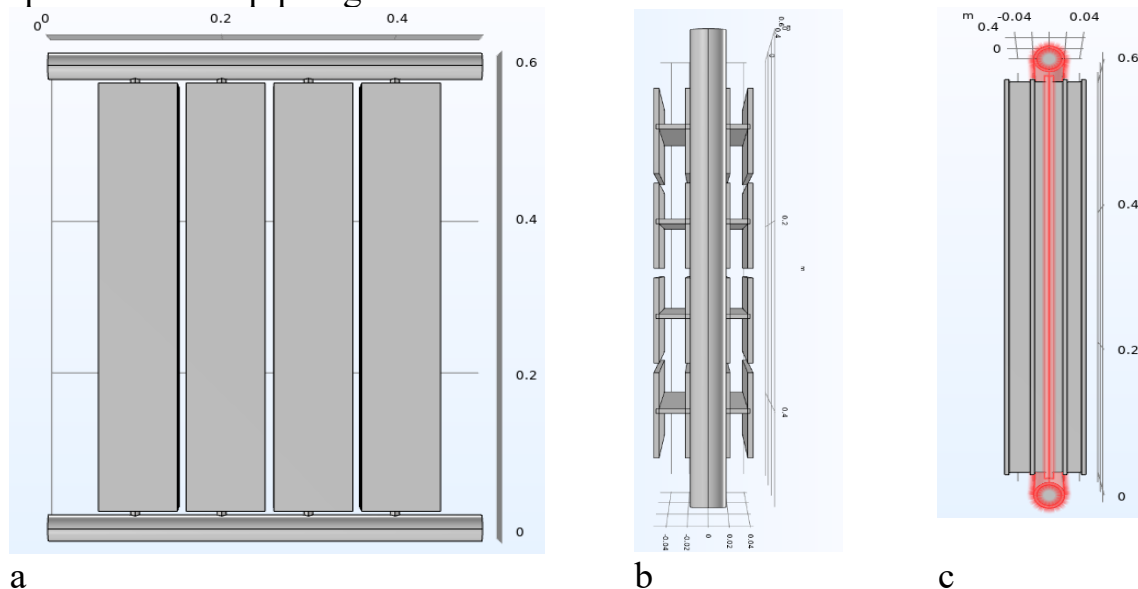
17-rasm. Re=7000 bo'lgandagi sonli usulda olingan o'qdagi tezlik profilining tajriba natijalari bilan solishtirilishi

Jadal turbulent almashinuv hisobiga bo'ylama tezlik profilining barqarorlashishi laminar rejimga qaraganda tezroq sodir bo'lishi aniqlandi. Agar laminar oqim rejimida boshlang'ich qism oxirida bo'ylama tezlikning o'q dagi qiymati ikki baravar ortgan bo'lsa, bizning ma'lumotlarimizga ko'ra, ushbu holatda ham bu o'sish 1.22–1.32 baravarni tashkil etdi. Shu bilan birga, Reynolds soni ortishi bilan o'q bo'yicha tezlikning barqarorlashgan qiymati kamayib bordi.

Radial tezlik tahlili (15-rasm) avvaliga quvur o'qi yaqinida suyuqlik massasining jadal to'planishini, so'ngra to'liq gidrodinamik barqarorlashuv gacha massaning qayta taqsimlanishini ko'rsatdi. Natijada, o'q bo'yicha qiymat nenyuton suyuqliklariga xos xarakterni takrorlagan holda nomonoton ko'rinishga ega bo'ldi (16-rasm).

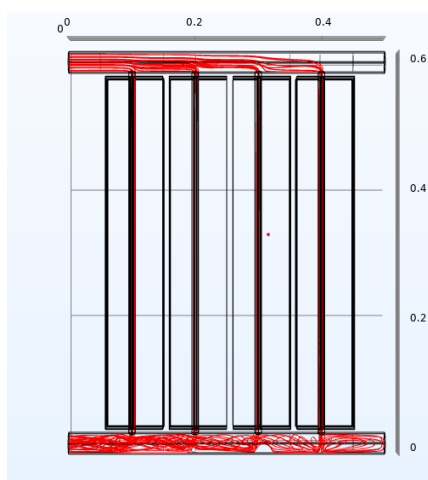
Modelning ishonchliligi muvaffaqiyatli verifikatsiya bilan tasdiqlandi. Devordagi ishqalanish koeffitsiyentining hisoblangan qiymatlari va o'q bo'yicha tezlik profillari Blasiusning klassik formulasi hamda ma'lum eksperimental ma'lumotlar bilan yuqori darajadagi yaqinlikni ko'rsatdi (17-rasm). Nusselt sonining qiymati Gnilinskiyning klassik natijalari bilan to'liq mos keldi. Turbulent kinetik energiyaning tadqiq qilinishi pulsatsiyalarning hosil bo'lishi (generatsiyasi) va dissipatsiyasi orasidagi dinamik muvozanat zonasi chegaralarini aniq belgilash imkonini berdi.

§4.3 da COMSOL Multiphysics dasturiy majmuasidan foydalangan holda zamonaviy ko‘p seksiyali suv isitish radiatoridagi (18-rasm) issiqlik va massa almashinuvi jarayonlarining uch o‘lchamli sonli modellashirilishi o‘tkazilgan. Navye-Stoks tenglamalari va SST $k-\omega$ turbulentlik modelining birgalikdagi yechimi asosida murakkab qovurg‘ali to‘rt seksiyali radiatorning gidrodinamikasi va issiqlik berishi tadqiq etilgan.

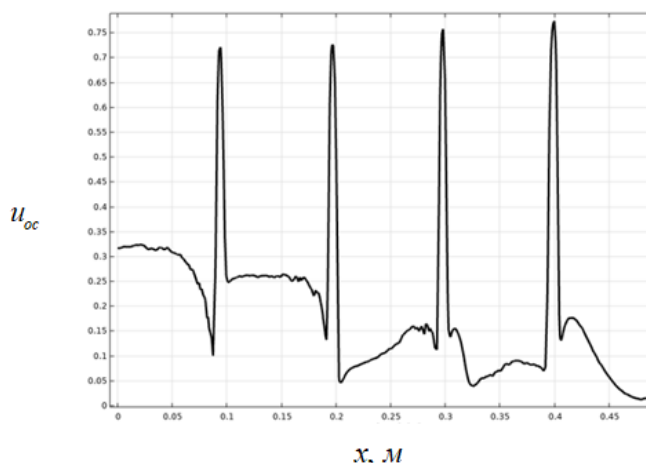


18-rasm. Radiator geometrik modelining umumiy ko‘rinishi

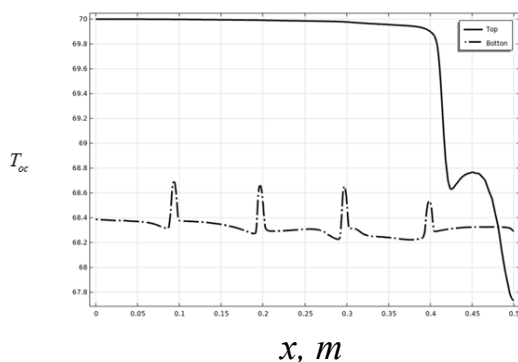
Issiqlik tashuvchining seksiyalar bo‘ylab taqsimlanishi oqimlar birlashgan nuqtalarda uyurmaviy sohalar hosil bo‘lishi va pastki kollektorda o‘q bo‘yicha tezlikning sezilarli darajada notekisligi bilan kechishi aniqlandi (19-rasm). Harorat maydonlarining tahlili yuqori quvurning boshi berk qismida turg‘unlik sohalarini va vertikal seksiyalar bo‘ylab haroratning deyarli chiziqli pasayishini ko‘rsatdi (20-22-rasmlar).



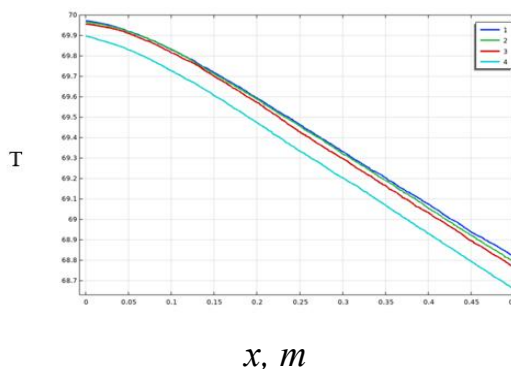
19-rasm. Quvurlar va seksiyakalar orqali o‘tuvchi oqim tezligi izolinialari



20-rasm. Pastgi gorizontall quvur o‘qidagi tezlik o‘zgarishi



21-rasm. Radiatorning yuqori va pastgi o'qlaridagi harorat o'zgarishlari



22-rasm. Vertikal seksiyalarda harorat o'zgarishi.

Zamonaviy issiqlik almashinuvchi qurilmaning ishlab chiqilgan 3D-modelidan bunday qurilmalarning samaradorligini tahlil qilish va ularni optimallashtirishda foydalanish mumkin.

XULOSA

Suv bilan isitish tarmoqlarida issiqlik va massa ko'chishi jarayonlarini matematik modellashtirish uchun hisoblash algoritmlarini ishlab chiqishga doir dissetatsiya ishi natijalari asosida quyidagi xulosalarga kelingan.

Laminar va turbulent oqimlarni o'rganishning fundamental yondashuvlari, issiqlik-massa almashinuvi nazariyalari hamda ularning masalalarini yechishning zamonaviy usullari tahlil qilindi va o'qqa nisbatan simmetrik quvurlarda issiqlik va massa ko'chishining dolzarb masalalari aniqlandi.

Quvur diametrining chiziqli o'zgarishi, quvur trassasi relyefi, tashqi muhit bilan issiqlik almashinuvi, solishtirma issiqlik sig'imining haroratga bog'liqligini hisobga olgan holda muhandislik hisoblari uchun bosim, tezlik va harorat birgalikda o'zgarishining kvazi bir o'lchovli statsionar, chiziqli bo'lmagan modeli taklif etildi.

Ushbu model kvadratik qarshilik qonuni asosida suyuqlik tezligi va harorati o'zgarishi xususiyatlarini turli sharoitlarda o'rganish imkonini bergan. Jumladan, qiyalik burchagining manfiy qiymatlarida dovonorti rejimi hosil bo'lishi, vertikal quvurlarda bosim o'zgarishining faqat gravitatsiya kuchi orqali shakllanishi, tezlikning kichik qiymatlarida haroratning yo'l-yo'lakay jadal o'zgarishi kabi xususiyatlari aniqlandi.

Massa, impuls va ichki energiya ko'chishining o'qqa nisbatan simmetrik tenglamalarini yechish uchun SIMPLE asosida tuzilgan samarali sonli usul ishlab chiqildi va quvurning boshlang'ich qismida laminar oqimning shakllanishi masalasini o'rganishga qo'llanildi.

Oqim boshlang'ich qismi uzunligining Reynolds soniga proporsionalligi, o'qdagi tezlikning monoton o'sib dastlabki tezlikka nisbatan ikki barobar ortishi, radial tezlikning dastlabki kesimlarda ahamiyatli manfiy qiymatga erishishi va uning oqim bo'ylab asta-sekin nolga intilishi, o'qdagi harorat o'zgarishining qatiy monotonligi kabi xulosalar tasdiqlandi.

Olingan sonli natijalar tajriba natijalariga, shuningdek COMSOL va ANSYS fluent paketlari yordamida olingan sonli natijalarga mosligi ko'rsatildi. Paketlarda

olingan natijalarda kuzatilgan oqim simmetriya o'qida harorat ossillyatsiyalari taklif etilgan sonli usulda bartaraf etilishi, bo'ylama tezlik profili va urinma kuchlanishning boshlang'ich qism oxirida klassik yechimlarga chiqishi aniqlandi.

Zamonaviy SST $k - \omega$ turbulentlik modeli asosida o'qqa nisbatan simmetrik quvur boshlang'ich qismida issiqlik va massa ko'chishi masalasi shakllantirildi va sonli usulda yechildi.

Sonli tajribalar asosida turbulent oqim rejimida oqim boshlang'ich qismining ancha qisqarishi, suyuqlikning quvur boshlang'ich qismida dastlab o'qqa tomon jadal ko'chishi, keyin esa qisman orqaga qaytishi, natijada o'qdagi tezlikning nonyuton suyuqliklar kabi nomonoton o'zgarishi, o'qdagi tezlik qiymatining boshlang'ich tezlikka nisbatan 1.2-1.3 marta ortishi, bu qiymatning Reynolds soni o'sishi bilan kamayishi, issiqlik ko'chishining laminar rejimga nisbatan jadal kechishi kabilar aniqlandi.

Reynolds sonining ortib borishi bilan devor yaqinida katta gradiyentlarning hosil bo'lishi va butun sohaga tarqalishi, turbulent almashinuvning jadallashishi aniqlandi. Olingan natijalarning klassik empirik qonuniyatlarga (Blazius, Dittus-Belter) to'liq mos kelishi tasdiqlandi.

Ko'p seksiyali zamonaviy radiatorlarning 21 milliondan ortiq elementdan iborat yuqori zichlikdagi 3D modeli asosida issiqlik tashuvchi oqimining murakkab masalasi yechildi va vizuallashtirildi. Tadqiqot natijasida radiator seksiyalari bo'ylab suyuqlikning notekis taqsimlanishi hamda issiqlik almashinuvini pasaytiruvchi "samarasiz (turg'un) sohalar" mavjudligi aniqlandi. Mazkur natijalar radiatorlarning optimal geometrik parametrlarini va seksiyalar sonini aniqlash imkonini berdi.

Tadqiqot natijalari "Buxoro suv ta'minoti" AJ faoliyatiga joriy etilib, magistral quvurlardagi bosim yo'qotishlarini 3–4% ga, issiqlik isrofini esa 4–5% ga kamaytirish imkonini berdi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.05/2025.27.12.T/FM.10.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ
МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ ИМ. М.Т.
УРАЗБАЕВА АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ
ИМ. М.Т. УРАЗБАЕВА АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

РАВШАНОВ ШОХЖАХОН АКМАЛЖОН УГЛИ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И
МАССОПЕРЕНОСА В ВОДЯНЫХ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ**

01.02.05 – Механика жидкости и газа

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD)
по ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ

Ташкент – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан под номером B2026.1.PhD/FM1150.

Диссертация выполнена в Институте механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (<https://institutemechanics.uz>) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель:	Хамдамов Музаффар Мухиддинович доктор технических наук, с.н.с.
Официальные оппоненты:	Махмудов Жамол Махмудович доктор физико-математических наук, проф. Хожиев Сафар доктор физико-математических наук, с.н.с.
Ведущая организация:	Нии развития цифровых технологий и искусственного интеллекта

Защита диссертации состоится «__» _____ г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.05/2025.27.12.T/FM.10.01 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии Наук Республики Узбекистан. (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40, зал заседаний-428. Тел. (99855) 520-02-45; (99855) 520-04-46, e-mail: instmech@academy.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии Наук Республики Узбекистан (зарегистрирована за № ____). (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурман йули, 40. Тел.(99855) 520-02-45).

Автореферат диссертации разослан «__» __ 2026 года.
(реестр Протокола рассылки № ____ от «__» __ 2026 года.)

М.М.Мирсаидов
Председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор, академик АН РУз

Ф.Ф.Адилов
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
PhD, с.н.с.

З.М.Маликов
Председатель Научного семинара при
Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мировой практике эффективное использование энергетических ресурсов, модернизация инфраструктур теплоснабжения и внедрение энергосберегающих технологий являются важнейшими стратегическими задачами. Сегодня, в эпоху стремительного развития цифровой экономики и интеллектуальных инженерных систем, особое внимание уделяется вопросам математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в трубопроводах и оптимизации их гидрогазодинамических характеристик. В настоящее время в развитых странах важное значение приобретает решение проблем, связанных с точным прогнозированием движения теплоносителя и распределения температуры в трубах сложной конфигурации и современных радиаторах отопления, снижением гидродинамических потерь и повышением общей эффективности системы. В связи с этим особое внимание уделяется вопросам дистанционного контроля и управления процессами распределения тепла на каждом участке трубопроводных систем, а также снижению общих эксплуатационных расходов и повышению эффективности системы в целом.

В мире проводятся исследования, направленные на усовершенствование математических моделей движения текучих сред в трубопроводах и распространения тепла в различных условиях и методов их расчета. Особенно важны точные вычисления для проектирования и управления системами, а также поиск альтернативных решений для стационарных процессов течения и теплообмена. Точное моделирование, учитывающее потерю кинетической энергии, теплопередачу через стенки и развитие ламинарных и турбулентных режимов на начальных участках труб, занимает ключевое место в гидравлических расчетах, автоматизированных системах управления и оптимизации затрат. Поэтому разработка и внедрение алгоритмов, способных полно описывать движение жидкости с учетом внешних воздействий и сложных параметров трубопроводов, остаются актуальными задачами.

В нашей республике на сегодняшний день проводится множество научно-исследовательских работ, направленных на создание эффективных систем отопления жилых зданий и рабочих мест, внедрение новых технологий, обеспечение бесперебойной доставки продукта потребителям в необходимых объемах и интервалах давления, а также на широкое применение методов математического моделирования и информационно-коммуникационных технологий в системах передачи. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы, в частности, определены задачи по «бесперебойному обеспечению экономики электроэнергией, а также активному внедрению технологий "зеленой экономики" во все сферы, повышению энергоэффективности экономики на 20 процентов»². При реализации данных задач важным является проведение исследований по разработке

² Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28.01.2022 г. „Стратегия развития Нового Узбекистан на 2022-2026 годы“

математических моделей, численных алгоритмов и программных средств, описывающих состояние процессов тепло- и массопереноса в системах водяного отопления в режиме реального времени.

Данная диссертационная работа в определенной степени служит реализации задач, изложенных в Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы», Постановлениях Президента Республики Узбекистан от 15 июля 2008 года № ПП-916 «О дополнительных мерах по стимулированию внедрения инновационных проектов и технологий в производство» и от 27 апреля 2018 года № ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», а также в других нормативно-правовых актах, связанных с данной деятельностью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Математика, механика, информатика».

Степень изученности проблемы. Гидродинамические и теплообменные процессы в трубах являются одним из фундаментальных направлений гидромеханики, а основы теории ламинарных и турбулентных течений, а также пограничного слоя были заложены в классических исследованиях Л. Прандтля, Т. Кармана, Г. Шлихтинга, И. Никурадзе и других. При моделировании турбулентных течений высокую эффективность показали модель SST Ф. Ментера, а также алгоритмы Б. Лаундера и Д. Сполдинга. При расчете конвективного теплообмена эмпирические корреляции Ф. Диттуса, Л. Бёлтера, Э. Сидера, Г. Тейта и В. Гнилинского до сих пор остаются основой инженерных расчетов. Также процессы в цилиндрических трубах были глубоко изучены многими учеными, такими как Гретц, Нуссельт, Дин, Активос. На сегодняшний день исследования интенсивно развиваются в направлении совершенствования математических моделей с учетом сложной топологии трубопроводных сетей, воздействия внешней среды и переменных режимов течения.

В Узбекистане также сформировались научные школы в этих направлениях. В частности, в результате научных трудов У. Далабоева, Н. Равшанова, З.М. Маликова, С. Ходжиева, М.Э. Мадалиева, Ф.Х. Назарова и других ученых были достигнуты важные результаты по разработке математических моделей турбулентных течений в каналах и применению численных методов. В изучении вопросов функционирования систем трубопроводов и их внедрении в практику в нашей республике проводили научные исследования и достигли положительных результатов Дж.Ф. Файзуллаев, Р. Садуллаев, К.Ш. Латипов, Ж. Акилов, Б. Хужаёров, И.К. Хужаев, С.И. Худойкулов, К. Наврузов, А.А. Мирзоев, Ж. Махмудов, О.М. Арифжонов, А.М. Фатхуллаев и ряд других ученых.

Вместе с тем, вопросы моделирования и численного исследования распространения тепла на основе современных моделей турбулентности с учетом температуры окружающей среды и сложной геометрической структуры труб изучены недостаточно.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ лаборатории «Механика жидкости, газа и гидроприводных систем» Института механики и сейсмостойкости сооружений имени М. Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан на 2022–2026 годы по теме «Математическое моделирование динамики многофазных сред, процессов горения и транспортировки природного газа»

Цель работы заключается в разработке математических моделей и численных методов, описывающих гидротермические процессы в трубах и системах отопления, и применении их для исследования закономерностей процессов тепло- и массообмена в различных режимах течения.

Задачи исследования:

разработана квазиодномерную математическую модель стационарных процессов в трубопроводах на основе уравнений сохранения массы, импульса и энергии, обеспечивающих взаимосвязь гидродинамических и тепловых параметров;

сформировать математические модели неизотермического ламинарного течения на начальном участке труб и разработать численные методы расчета на основе метода SIMPLE для их решения;

исследовать динамику кинетической энергии турбулентности и ее диссипации на начальном участке трубы с помощью современной SST $k - \omega$ модели турбулентности, а также проанализировать закономерности стабилизации показателей потока импульса и тепла;

разработать 3D-модель современных теплообменников водяного отопления и использовать ее при оценке их эффективности;

обосновать адекватность разработанных математических моделей и полученных численных результатов путем сравнительного анализа с классическими эмпирическими формулами и результатами современных программных комплексов вычислительной гидродинамики.

Объектом исследования служило неизотермическое движение теплоносителя в трубопроводах переменного и постоянного сечения.

Предметом исследования является разработка математических моделей и вычислительных алгоритмов для изучения процессов тепло- и массопереноса на начальных и основных участках трубопроводов.

Методы исследования. В процессе исследования использовались методы математического моделирования, численные методы, а также методы визуализации численных результатов с помощью информационно-коммуникационных технологий.

Научная новизна результатов исследования:

разработана квазиодномерная стационарная модель течения жидкости в трубопроводах переменного диаметра и получены численные результаты, описывающие путевых изменений скорости потока, давления и температуры;

разработаны математические модели и численный алгоритм расчета на основе метода SIMPLE начального участка осесимметричного трубопровода с постоянными и зависящими от температуры значениями коэффициентов динамической вязкости, теплопроводности и удельной теплоемкости жидкости;

на основе современной SST $k - \omega$ модели турбулентности исследована динамика кинетической энергии турбулентности и ее диссипации на начальном неизотермическом участке трубопровода и доказано быстрое установление числа Нуссельта за счет турбулентной диффузии чем в ламинарном режиме течения;

разработанная 3D-модель современного многосекционного теплообменника водяного отопления использована для выявления неравномерного распределения потоков по секциям теплообменника и неэффективных его зон.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

предложен алгоритм прогнозирования потерь энергии и давления в теплообменниках с учетом температуры окружающей среды;

в среде Python разработан программный комплекс, учитывающий зависимость гидравлических параметров от температуры окружающей среды при ламинарном и турбулентном режимах течения и сокращающий время расчета до 50 раз за счет применения механизмов параллельных вычислений;

разработан алгоритм расчета радиаторов водяного отопления со сложными элементами поперечного сечения, который служит основой для оптимизации геометрических параметров радиатора и повышения его тепловой эффективности.

Достоверность полученных результатов исследования. Достоверность результатов исследования обосновывается их строгим соответствием законам сохранения массы, импульса и энергии, обеспечением необходимой точности при получении численных решений, устойчивостью и сходимостью вычислительного процесса, а также соответствием полученных результатов классическим эмпирическим формулам (Блазиуса, Гнилинского, Сидера-Тейта, Диттуса-Бёлтера).

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования обосновывается разработкой усовершенствованных квазиодномерных и двумерных моделей формирования потока и процессов тепломассопереноса в трубах, выявлением закономерностей влияния теплофизических параметров и геометрических форм на гидротермические показатели, а также определением динамики их стабилизации.

Практическая значимость результатов исследования аргументируется возможностью использования вычислительных алгоритмов и полученных

решений для прогнозирования тепловой эффективности в системах труб и радиаторов, оптимизации гидравлических потерь и выявлением «неэффективных зон», а также созданием комплекса программных продуктов в средах Python/Comsol, предназначенных для этих целей.

Внедрение результатов исследования. На основании результатов исследования, проведенного по теме «Математическое и численное моделирование процессов тепло- и массопереноса в сетях водяного отопления»:

усовершенствованная математическая модель и алгоритмы расчета, описывающие тепло- и массоперенос в трубопроводных сетях, внедрены на объектах АО «Бухоро сув таъминоти» (акт внедрения АО «Бухоро сув таъминоти» от 01.03.2026 г.). В результате создана возможность прогнозирования потенциальных неисправностей (аварийных ситуаций) в магистральных трубопроводах водоснабжения, что позволило снизить потери давления в системе на 3–4 %, потери тепла на 4–5 %, а также повысить общую эффективность системы на 4–5 %;

программное обеспечение, разработанное для расчета процессов тепломассопереноса в трубах переменного сечения, внедрено в деятельность АО «Бухоро сув таъминоти» (справка АО «Бухоро сув таъминоти» №383 от 06.03.2026 г.). В результате автоматизирован процесс определения гидравлических и тепловых параметров при проектировании трубопроводных систем с переменным диаметром и сложным рельефом, а за счет предложенного квазиодномерного подхода достигнуто сокращение времени расчета на 5–10 %.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования обсуждались на 2 международных и 2 республиканской научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 11 научных статей опубликованы в научных изданиях, рекомендованных к публикации ВАК Республики Узбекистан основных научных результатов докторских диссертаций, из них 4 – в зарубежных и 7 – в ВАК журналах, на 3 программных продукта для ЭВМ получены свидетельства Агентства по интеллектуальной собственности.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость

полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в практику, сведения об опубликованных работах и о структуре диссертации.

В первой главе диссертации представлены **«Теоретические основы моделирования течений и процессов тепло- и массопереноса»**.

В §1.1 проанализированы теоретические основы моделирования ламинарных и турбулентных режимов движения жидкости. Изложена история формирования фундаментальных уравнений Навье-Стокса как системы уравнений неразрывности и движения. Рассмотрена роль числа Рейнольдса в определении характера потока, а также влияние градиента давления на формирование профиля скорости и устойчивость пограничного слоя.

В §1.2 представлены теоретические подходы к моделированию процессов теплообмена. На основе законов сохранения энергии проанализированы математические выражения теплопроводности, конвекции и излучения. Рассмотрены закон Фурье, гиперболические уравнения теплопроводности Максвелла–Каттанео–Лыкова, а также их представления в различных системах координат для описания локально-неравновесных процессов.

В §1.3 обсуждены современные численные методы решения гидротермических задач. Рассмотрены особенности применения метода контрольного объема, метода конечных элементов и метода конечных разностей при расчете потоков в трубах. Особое внимание уделено алгоритму SIMPLE для связи давления и скорости, современным моделям турбулентности, а также неявной схеме Писмена–Рэкфорда. Проведенный обзор существующих методов и подходов позволил обосновать актуальность темы и сформулировать цель и задачи данного исследования.

Вторая глава работы называется **«Математическое и численное моделирование тепло- и массопереноса в рельефном трубопроводе с переменным диаметром»**.

В §2.1 предложены квазиодномерная математическая и численная модели процессов тепло- и массопереноса в трубопроводе водяной системы отопления. В рамках модели реальные свойства жидкости-теплоносителя учтены через коэффициент объемного сжатия и переменную удельную теплоемкость. Рассмотрена задача о стационарном неизотермическом состоянии реальной жидкости в элементарном рельефном участке трубопровода при постоянном и переменном диаметрах.

В качестве данных заданы входные значения давления, скорости потока и температуры жидкости, а также геометрические показатели участка (длина L , внутренний диаметр $D(x)$, толщина стенки h). Учтен профиль трассы $z(x)$ и уклон $\sin \alpha$ в уравнении сохранения импульса. Расчеты проведены для развитого турбулентного режима с использованием формулы Шифринсона для коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\lambda(x) = 0.11(k_{\text{эк}} / D(x))^{0.25}. \quad (1)$$

Проведен комплексный анализ результатов при варьировании конструктивных параметров трубопровода, параметров окружающей среды и теплофизических показателей объекта, что позволило выявить закономерности изменения состояния системы в различных эксплуатационных условиях.

Неизотермическое состояние жидкости в трубопроводе описывается квазиодномерными уравнениями сохранения массы, импульса и внутренней энергии:

$$\begin{cases} f \rho u = M = const, \\ M \frac{du}{dx} + f \frac{dp}{dx} + \frac{\lambda}{2D} M |u| + f \rho g \sin \alpha = 0, \\ M \frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{\lambda}{2D} M u |u| - k_{cp} \bar{f}_{op} (T - T_{oc}). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь и далее $\rho(x)$, $u(x)$, $p(x)$, $T(x)$ – средние значения плотности, скорости, давления и абсолютной температуры жидкости в сечении x ($\text{кг}/\text{м}^3$, $\text{м}/\text{с}$, Па , К); $f(x) = \pi D^2(x)/4$ – площадь поперечного сечения трубопровода (м^2); $g = 9.80665 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение силы гравитации; $\varepsilon = c_B T$ – удельная внутренняя энергия жидкости ($\text{Дж}/\text{кг}$); $c_B = (a + bT + c'/T^2)/\mu$ – удельная теплоемкость жидкости ($\text{Дж}/\text{кг}/\text{К}$); μ – молярная масса жидкости ($\text{кг}/\text{моль}$); k_{cp} – коэффициент теплоотдачи от жидкости в окружающую среду через стенки трубопровода и изоляции с учетом естественной конвекции [$\text{Дж}/(\text{м}^2 \text{ с К})$]; $\bar{f}_{op}(x) = \pi(D(x) + 2\delta)$ – площадь наружной поверхности трубопровода, соответствующая на 1 погонный метр (м); δ – толщина стенки трубопровода (м); $T_{oc}(x)$ – температура окружающей среды (К).

В расчетах для воды использовали формулу:

$$c_B(T) = 39.02 + 0.07664T + 1196000/T^2 \quad (\text{Дж моль}^{-1} \text{ К}^{-1}). \quad (3)$$

Взаимосвязь между давлением и плотности, при известных их характерных значениях p_* , ρ_* , выражается через модуль упругости k жидкости:

$$p - p_* = \frac{k}{\rho_*} (\rho - \rho_*). \quad (4)$$

Введя обозначений $p_\Delta = p_* - k$, $c^2 = k/\rho_*$ и выразив составляющих второго уравнения системы через давление, при $M \geq 0$ составлено дифференциальное уравнение:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\left(\frac{M^2 c^2}{f^2(p - p_\Delta)} \right) \frac{df}{dx} - \frac{\lambda}{2D} \frac{M^2 c^2}{f(p - p_\Delta)} - f \frac{p - p_\Delta}{c^2} g \sin \alpha}{f \left(1 - \frac{M^2 c^2}{f^2(p - p_\Delta)^2} \right)}. \quad (5)$$

При $M = 0$ кг/с данное уравнение приобретает вид:

$$\frac{dp}{dx} = -\rho g \sin \alpha, \quad (6)$$

которое дает своеобразное барометрическое распределение давления в покоем участке согласно объемному сжатию жидкости под давлением верхних ее слоев:

$$p(x) = p_\Delta + (p_0 - p_\Delta) e^{-\frac{g}{RT} [y(x) - y(0)]} \quad (7)$$

При значении шага интегрирования Δx в следующей расчетной точке значение давления согласно (5) вычисляли по формуле:

$$p_{i+1} = p_i + \Delta x \frac{\left(\frac{M^2 c^2}{f_i^2(p_i - p_\Delta)} \right) \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} - \frac{\lambda_i}{2D_i} \frac{M^2 c^2}{f_i(p_i - p_\Delta)} - f_i \frac{p_i - p_\Delta}{c^2} g \sin \alpha_i}{f_i \left(1 - \frac{M^2 c^2}{f_i^2(p_i - p_\Delta)^2} \right)}. \quad (8)$$

Апробация численного способа интегрирования с шагом 1 м для общей длины участка 1000 м дала хороший результат. Сравнение давления с результатами (7) дало отклонение не более 0.1 Па (относительная ошибка не превышает 10^{-6}).

При известном значении давления $p(x)$ плотность и скорость жидкости определяли по формулам:

$$\rho = \frac{p - p_\Delta}{c^2}, \quad (9)$$

$$u = \frac{M c^2}{f(p - p_\Delta)} \quad (10)$$

Распределение внутренней энергии транспортируемой жидкости определяли путем решения третьего уравнения системы (2) при условии $\varepsilon(0) = c_B(T_0)T_0$. Представляя третье уравнение системы (2) следующим образом:

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{\lambda}{2D} \frac{M^3 c^4}{f^2(p - p_\Delta)^2} - \frac{k_{cp} \bar{f}_{op}}{M} (T - T_{oc}), \quad (11)$$

составлено рекуррентное соотношение:

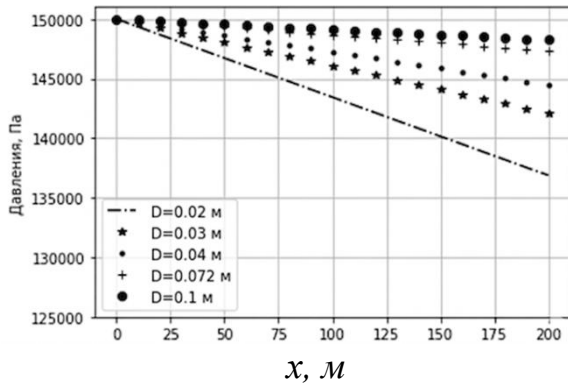
$$\varepsilon_{i+1} = \varepsilon_i + \Delta x \left(\frac{\lambda_i}{2D_i} \frac{M^3 c^4}{f_i^2 (p_i - p_\Delta)^2} - \frac{k_{cp} \bar{f}_{op}}{M} (T_i - T_{oc}) \right). \quad (12)$$

Обратный переход к температуре T_{i+1} из ε_{i+1} осуществляли решением кубического уравнения относительно температуры:

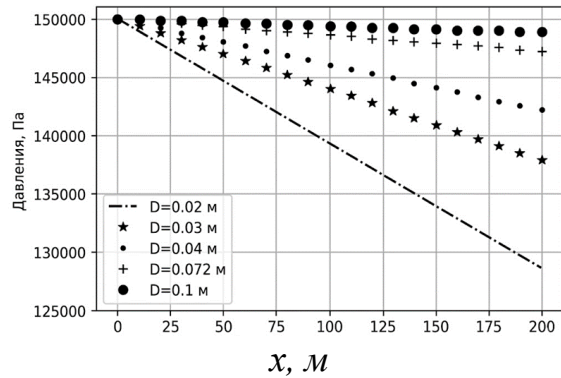
$$\left(39.02 + 0.07664 T_{i+1} + 1196000 / (T_{i+1})^2 \right) T_{i+1} - \mu \varepsilon_{i+1} = 0 \quad (13)$$

по методу деления отрезка пополам (в программе обеспечено строгое выполнение условия с точностью 10^{-10}). Полученное значение для следующего узла используется как T_i .

В §2.2 исследованы закономерности изменения давления и температуры вдоль горизонтальных и наклонных трубопроводов в зависимости от их геометрических и эксплуатационных параметров. Проанализировано влияние силы гравитации на энергетический режим потока при различных углах наклона.



$\sin \alpha = 0, k_{\text{эКВ}} = 0.0001 \text{ м}, u = 0.3 \text{ м/с}$



$\sin \alpha = -0.001, k_{\text{эКВ}} = 0.001 \text{ м}, u = 0.3 \text{ м/с}$

Рис. 1. Графики изменения давления при разных диаметрах

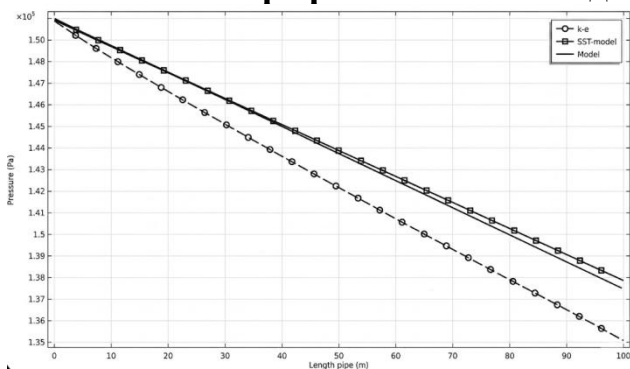


Рис. 2. Сравнение с результатами турбулентных моделей $k-\varepsilon$ и SST.

$\sin \alpha = 0, D = 0.03 \text{ м},$

$u = 0.4 \text{ м/с}, k_{\text{эКВ}} = 0.001 \text{ м}$

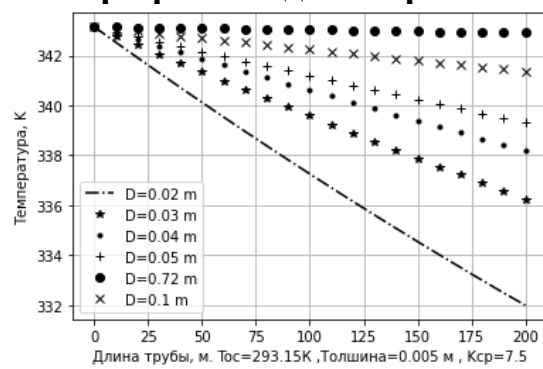


Рис. 3. Изменение температуры жидкости при различных диаметрах.

$\delta = 0.005 \text{ м}, L = 200 \text{ м}, \mu = 0.001 \text{ Па с},$

$k_{cp} = 7.5 \text{ Дж} / (\text{м}^2 \text{ с К}), T_{oc} = 293.15 \text{ К}$

Расчеты выполнены для труб с диаметром $D=0.1\text{ м}$ с учетом эквивалентной шероховатости 0.1 мм при начальной скорости $u_0=1\text{ м/с}$ и давлении $p_0=1.5\text{ МПа}$. В рамках исследования теплообмена оценены потери энергии при различных значениях толщины стенки ($h=5, 8, 10\text{ мм}$) и варьировании температуры окружающей среды. На основе численных результатов определены температурные градиенты и установлена зависимость тепловых потерь от обобщенного коэффициента теплоотдачи системы.

В §2.3 исследованы гидродинамические и тепловые процессы в трубопроводах с переменным поперечным сечением, включая участки с плавным (с конфуззором и диффузором) и скачкообразным (внезапным) изменениями диаметра.

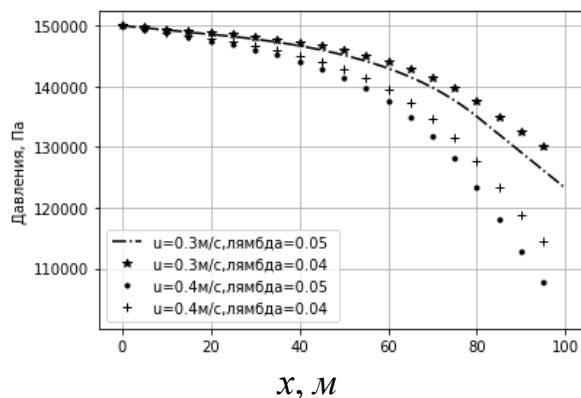


Рис. 4. Графики изменения давления в трубопроводе с конфуззором

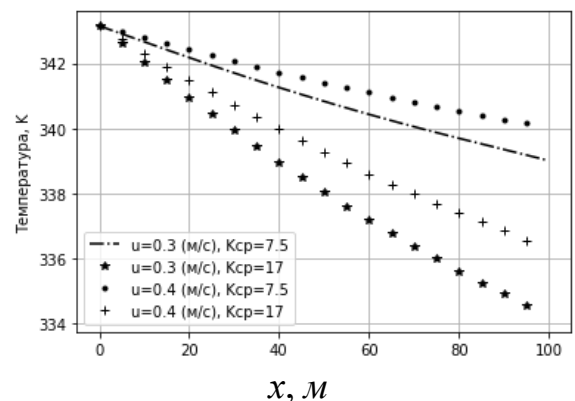


Рис. 5. Графики изменения температуры в трубопроводе с конфуззором

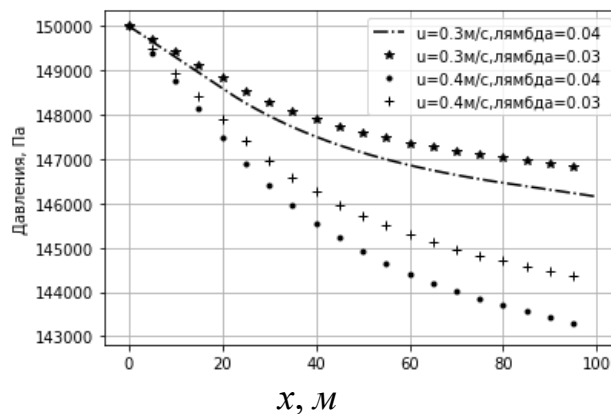


Рис. 6. Изменение давления в трубопроводе с диффузором

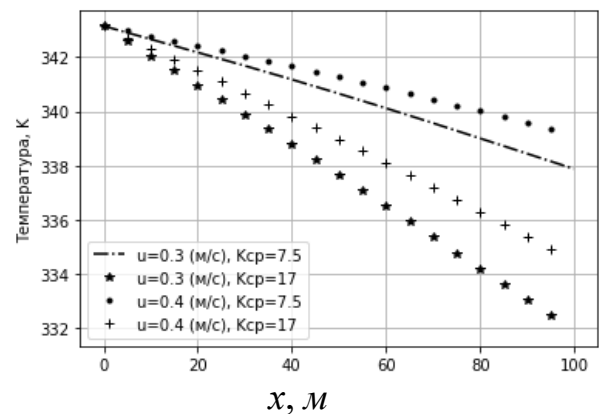


Рис. 7. Изменение температуры в трубопроводе с диффузором
 $T_{oc} = 293.15\text{ К}, T_{ол} = 5.0\text{ мм}$

Установлено, что сужение проходного сечения приводит к резкому падению статического давления и замедлению потери температуры теплоносителя за счет ускорения потока и сокращения времени контакта со стенкой (рис. 4 и 5). Расширение трубы, напротив, сопровождается восстановлением давления и ускоренным остыванием жидкости из-за снижения скорости и увеличения времени транзита (рис. 6 и 7). Выявлены

критические скачки давления при внезапном изменении геометрии трубы, обусловленные локальными гидравлическими сопротивлениями и взаимным переходом кинетической и потенциальной энергии потока. Также проанализирован процесс нагрева жидкости высокотемпературной внешней средой, результаты которого доказали, что для максимальной интенсификации теплообмена наиболее эффективным является применение тонкостенных труб малого диаметра с высокой теплопроводностью.

Результаты моделирования позволяют прогнозировать энергетическую эффективность элементов систем отопления при различных климатических условиях и конструктивных характеристиках объектов.

В третьей главе произведено **«Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса на начальном участке горизонтальной цилиндрической трубы в ламинарном режиме течения»**.

В §3.1 представлены постановка задачи (рис. 8) и математическая модель процессов тепло- и массопереноса на начальном участке цилиндрической трубы. В отличие от упрощенных квазиодномерных подходов, исследуется механизм формирования течения Пуазейля и поля температуры при перестроении однородных входных профилей. Математический аппарат базируется на системе уравнений Навье–Стокса и уравнения энергии в цилиндрических координатах. Для реализации модели предложен численный метод на основе алгоритма SIMPLE, позволяющий детально изучать влияние постоянных и переменных теплофизических свойств среды (коэффициента динамической вязкости μ , удельной изобарической теплоемкости c_p , коэффициента теплопроводности λ жидкости) на структуру потока вплоть до его стабилизации.

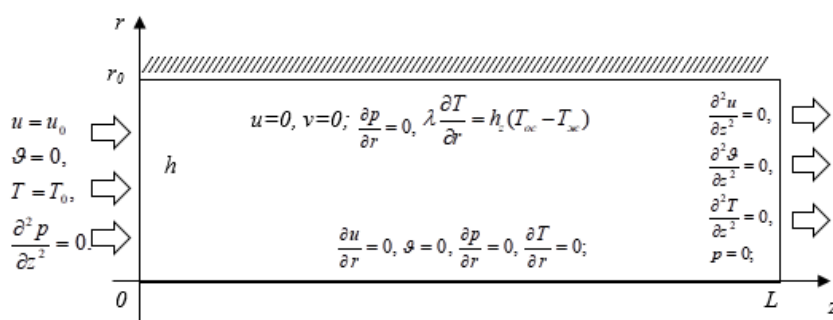


Рис. 8. Геометрия и граничные условия задачи

Задача решалась с привлечением уравнений сохранения массы, импульса и количества тепла по двум координатам в безразмерных переменных:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial(r\bar{g})}{\partial r} + \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{\mu} r \frac{\partial\bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{\mu} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} \right) \right), \\ \frac{\partial\bar{g}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{g}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{g}}{\partial z} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{\mu} r \frac{\partial\bar{g}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{\mu} \frac{\partial\bar{g}}{\partial z} \right) - \bar{\mu} \frac{\bar{g}}{r} \right), \\ \frac{\partial\bar{T}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial\bar{T}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial\bar{T}}{\partial z} = \frac{1}{\text{RePr} C_v(T)} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{r} a \frac{\partial\bar{T}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{a} \frac{\partial\bar{T}}{\partial z} \right) \right). \end{cases} \quad (14)$$

Здесь $\bar{a} = \lambda(T)\bar{\mu}$; $\bar{\mu} = \mu(T)/\mu_*$; μ_* – характерная динамическая вязкость среды. Для описания изменения ламинарной динамической вязкости жидкости использовали формулу $\mu(T) = 2.414 \times 10^{\frac{247.8}{T-140}-5}$, удельной теплоёмкости жидкости – $C_v(T) = 4180 + 3.1(T-20)$, а для теплопроводности ее – $\lambda(T) = 0.561 + 0.0019T$.

В §3.2 разработан численный алгоритм решения системы безразмерных уравнений Навье-Стокса на базе метода SIMPLE, который использован при изучении состояния начального участка цилиндрического канала. Вычислительный процесс строго разделен на два этапа: сначала с помощью одномерной радиальной прогонки решается гидродинамическая задача (определяются поля скоростей и давления), после чего на основе полученных данных рассчитывается температурное поле.

В §3.3 разработан программный продукт на базе среды Python и проведены вычислительный эксперимент, анализ результатов численного расчета. Расчеты проведены с учетом варьируемой длины трубопровода, заданных чисел Рейнольдса и Прандтля, а также теплофизических характеристик жидкости (воды) и материала стенки трубы (алюминия). На основе полученных гидродинамических данных вычислены внутренние и внешние числа Нуссельта, а также определены общий коэффициент и объем теплопередачи от теплоносителя в окружающую среду.

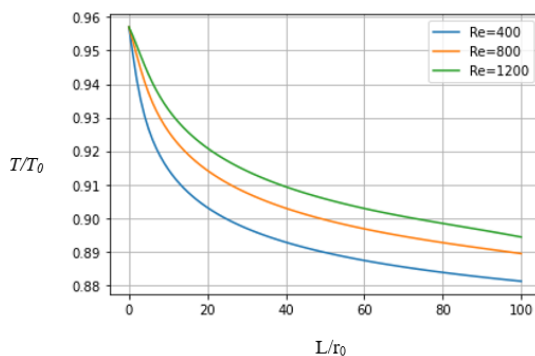


Рис. 9. Температура на стенке при различных числах Re. $Pr=5$

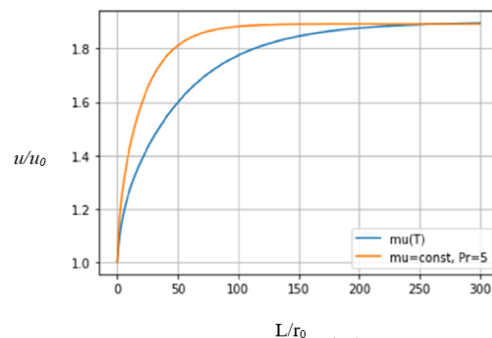


Рис. 10. Осевые скорости при $Re = 400$ для $\mu = const$ и $\mu(T)$

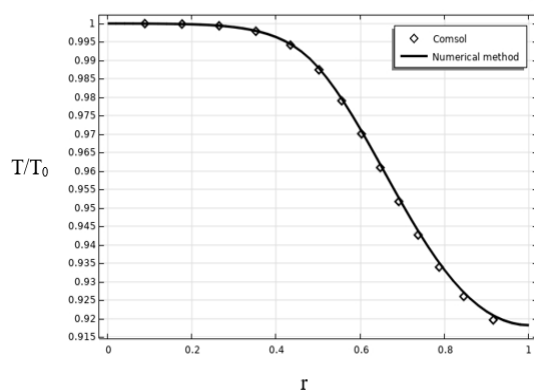


Рис. 11. Сравнение распределения температуры в радиальном направлении с результатами Cmsol Multiphysics

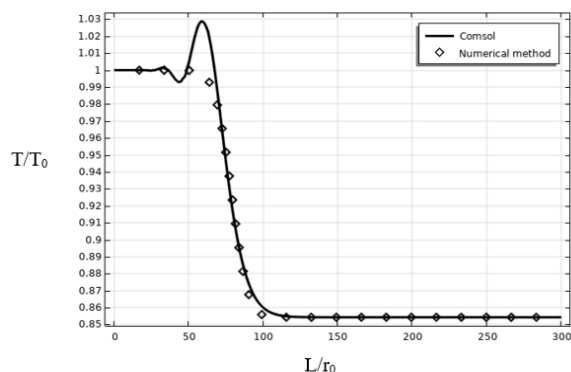


Рис. 12. Сравнение изменения осевой температуры по модели и результатам Cmsol Multiphysics

Установлено, что с увеличением числа Рейнольдса интенсивность теплоотдачи возрастает (рис. 9). При не зависящей от температуры ламинарной составляющей динамической формирования предельного значения осевой скорости вязкости профили скорости переменной протекает интенсивно (рис. 10). Обеспечили хорошее согласование профилей температуры с результатами Cmsol Multiphysics (рис. 11). Как видно из рис. 12, результаты Cmsol Multiphysics демонстрируют небольшие осцилляции в сечениях с большим градиентом температуры.

Итак, достоверность модели подтверждена комплексной верификацией: результаты расчетов продемонстрировали высокую сходимость как с данными программных комплексов COMSOL Multiphysics и ANSYS Fluent, так и с классическими эмпирическими формулами (Пуазейля и Нуссельта). Математическую модель и численный алгоритм можно использовать для описания гидродинамических и тепловых процессов в ламинарном режиме течения.

В четвертой главе произведено «**Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в турбулентном потоке в горизонтальных цилиндрических трубах и радиаторах**».

В §4.1 сформулирована математическая постановка задачи тепло- и массопереноса на начальном участке горизонтальной цилиндрической трубы в условиях турбулентного режима течения. Описана расчетная область в цилиндрической системе координат и заданы соответствующие условия (рис. 13). В частности, на входе заданы значения скорости, температуры и параметров турбулентности (кинетическая энергия и удельная скорость диссипации), а на стенке трубы заданы условия прилипания, пристеночные параметры турбулентной модели SST и учтен конвективный теплообмен с окружающей средой.

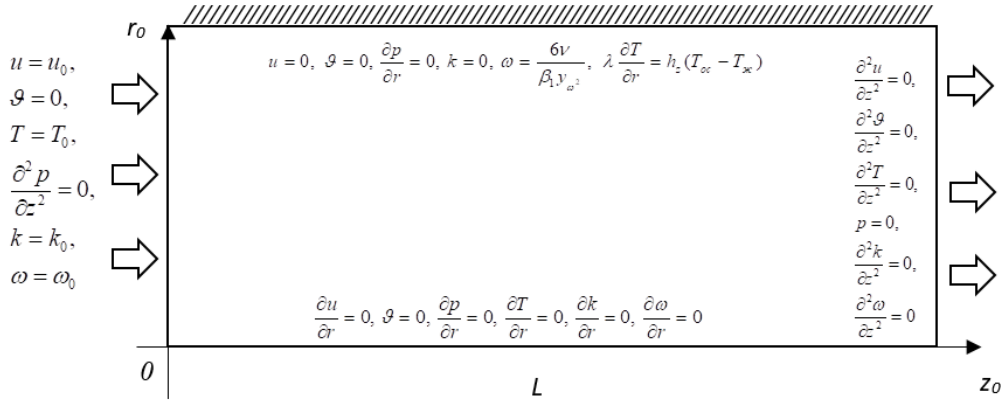


Рис. 13. Геометрическая схема расчётной области

Безразмерный вид уравнений переноса и сохранения субстанций составил:

$$\begin{cases}
 \frac{1}{r} \frac{\partial(r\bar{g})}{\partial r} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = 0, \\
 \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) r \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right], \\
 \frac{\partial \bar{g}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial \bar{g}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{g}}{\partial z} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) r \frac{\partial \bar{g}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) \frac{\partial \bar{g}}{\partial z} \right] - \left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{v}_t \right) \frac{\bar{g}}{r^2}, \\
 \frac{\partial \bar{k}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial \bar{k}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{k}}{\partial z} = P_k - \beta_0^* \omega \bar{k} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{\sigma}_k \bar{v}_t \right) r \frac{\partial \bar{k}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{\sigma}_k \bar{v}_t \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial z} \right], \\
 \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial z} = \bar{\alpha} \frac{\bar{\omega}}{k} P_k - \beta_0 \bar{\omega}^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{\sigma}_\omega \bar{v}_t \right) r \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \bar{\sigma}_\omega \bar{v}_t \right) \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial z} \right], \\
 c_v(\bar{T}) \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{g} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{1}{\text{Re Pr}(\bar{T})} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{1}{\text{Re Pr}(\bar{T})} \frac{\mu(\bar{T})}{\mu_*} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right].
 \end{cases} \quad (15)$$

Для описания изменения ламинарной составляющей динамической вязкости жидкости использовали формулу $\mu_t(T) = 2.414 \cdot 10^{\frac{247.8}{T-140}-5}$ Па с, удельной теплоёмкости жидкости $C_v(T) = 4180 + 3.1(T - 20)$ Дж / кг / К, а коэффициента теплопроводности $\lambda(T) = 0.561 + 0.0019T$ Вт / (м / К). Дополнительно учитывали следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
 \nu_t &= \frac{k}{\omega}, \quad P_k = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 \right], \\
 \alpha &= \frac{13}{25}, \quad \sigma_k^* = \frac{1}{2}, \quad \sigma_\omega = \frac{1}{2}, \quad \beta_0 = \beta_0^* = \frac{9}{125}, \quad \text{Pr}_t \approx 0.85, \quad \text{Pr}(\bar{T}) = \frac{\mu(T)c_v(T)}{\lambda(T)}.
 \end{aligned}$$

Для решения задачи использовали численный метод и алгоритм, описанные в предыдущей главе. При этом учитывали внесенные выше поправки: переменность коэффициентов турбулентного переноса субстанций согласно модели $k - \omega$ SST, сама модель $k - \omega$ SST и коэффициенты ламинарного переноса в зависимости от переменной температуры.

В §4.2 проведен анализ полученных результатов численного эксперимента в среде Python и выявлены особенности формирования турбулентного потока в начальном участке трубы при $Re=6000-15000$.

Графики давления по длине начального участка (рис. 14) оказались аналогичными, которые получены в ламинарном режиме течения.

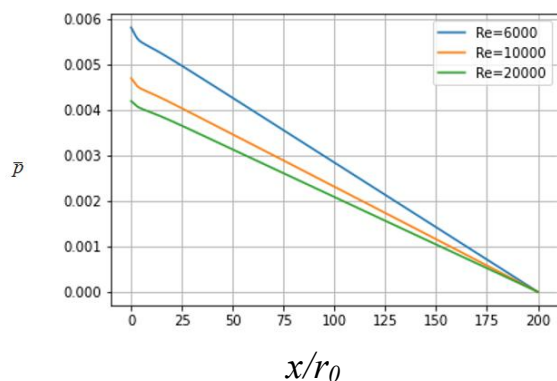


Рис. 14. Падение статического давления вдоль оси трубы при различных числах Рейнольдса

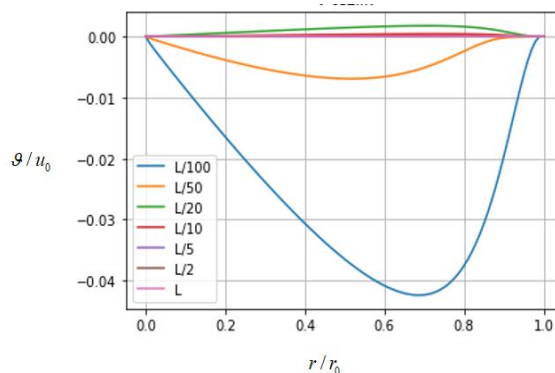


Рис. 15. Графики радиальной скорости в различных сечениях по длине трубы

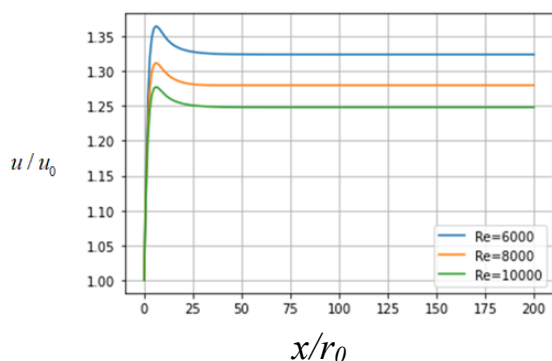


Рис. 16. Изменение осевого значения скорости потока при различных числах Рейнольдса

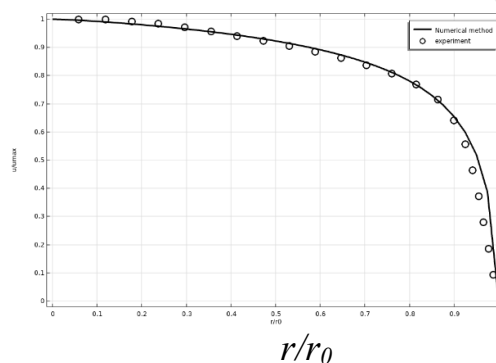


Рис. 17. Сравнение профиля осевой скорости, полученного численным методом, с экспериментальными данными $Re=7000$

Установлено, что за счет интенсивного турбулентного обмена стабилизация профиля продольной скорости происходит быстрее, чем в ламинарном режиме. Если осевое значение продольной скорости в конце начального участка в ламинарном режиме течения возрастало в два раза, то в данном случае это возрастание по нашим данным составляло в 1.22–1.32 раз. Притом с ростом числа Рейнольдса установившееся значение осевой скорости убывает.

Анализ радиальной скорости (рис. 15) показал сначала интенсивное скопление массы жидкости около оси трубы и последующее перераспределение массы до полной гидродинамической стабилизации. В результате осевое значение получилось немонотонное (рис. 16), повторяя характер неньютоновских жидкостей.

Достоверность модели подтверждена успешной верификацией: расчетные значения коэффициента трения на стенке и профили осевой скорости продемонстрировали высокую сходимость с классической формулой Блазиуса и известными экспериментальными данными (рис. 17). Значение числа Нуссельта полностью совпало с классическими результатами Гнилинского. Исследование турбулентной кинетической энергии позволило точно определить границы зоны динамического равновесия между генерацией и диссипацией пульсаций.

В §4.3 проведено трехмерное численное моделирование процессов тепломассообмена в современном многосекционном радиаторе (рис. 18) водяного отопления с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics. На основе совместного решения уравнений Навье-Стокса и модели турбулентности SST исследована гидродинамика и теплоотдача четырехсекционного радиатора со сложным оребрением.

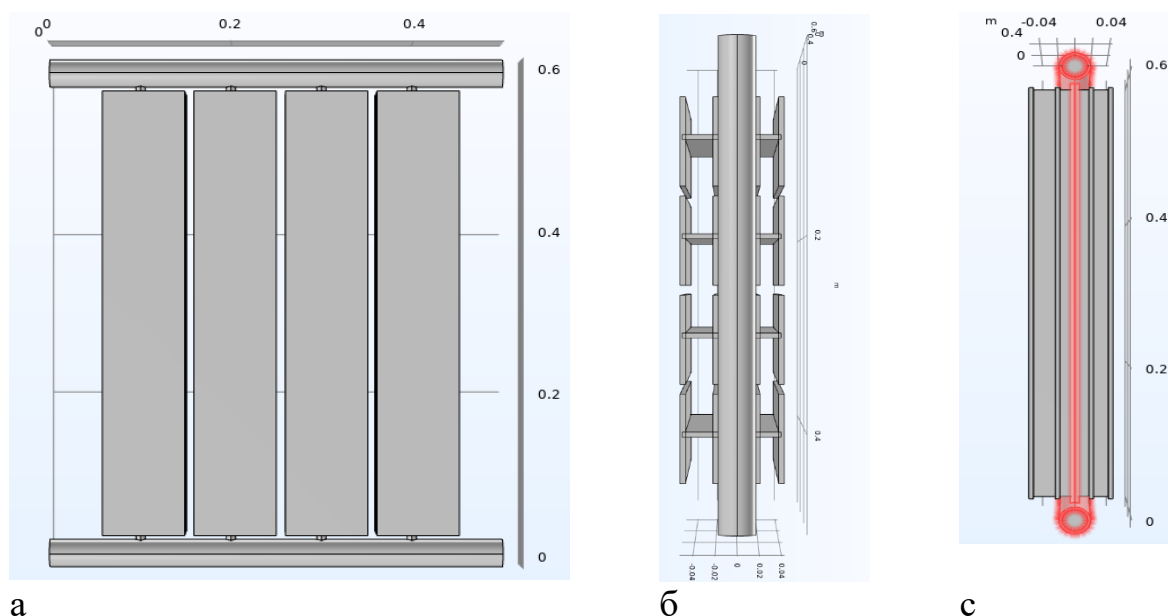


Рис. 18. Общий вид геометрической модели радиатора

Установлено, что распределение теплоносителя по секциям сопровождается образованием вихревых зон в точках слияния потоков и существенной неравномерностью осевой скорости в нижнем коллекторе (рис. 19). Анализ температурных полей выявил зоны застоя в тупиковом участке верхнего патрубка и практически линейное снижение температуры вдоль вертикальных секций (рис. 20-22).

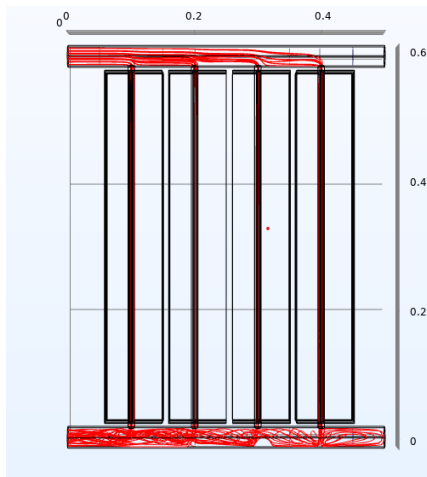


Рис. 19. Изолинии функции тока по сечению, проходящей через оси труб и патрубков

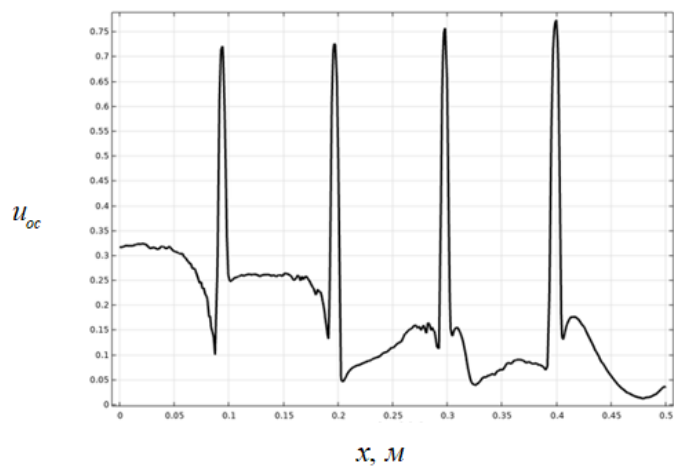


Рис. 20. Изменение осевой скорости потока по нижнему горизонтальному патрубку

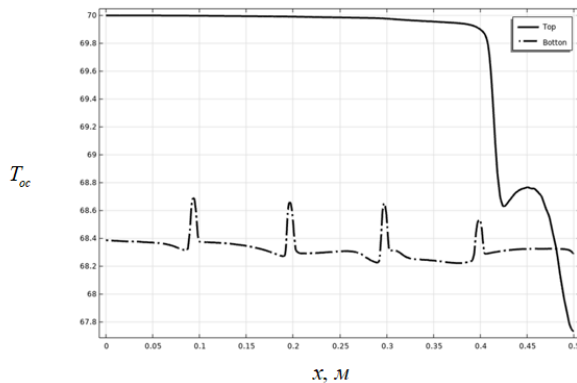


Рис. 21. Изменение температуры в оси верхнего и нижнего патрубков радиатора

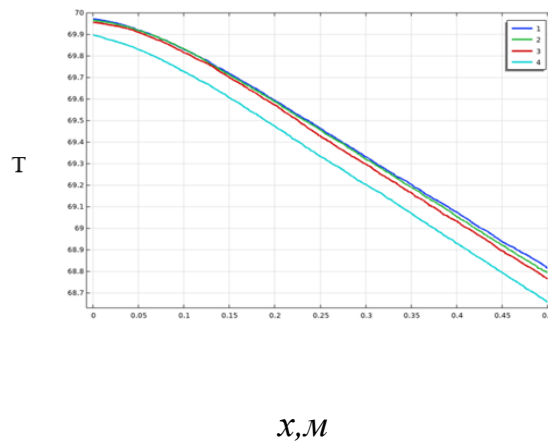


Рис. 22. Изменение осевой температуры теплоносителя в вертикальных патрубках радиатора

Применение разработанной 3D-модели современного теплообменника можно использовать при факторном анализе эффективности и оптимизации таких устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов диссертационной работы, посвященной разработке вычислительных алгоритмов и исследованию процессов теплообмена и течения жидкости в водяных системах отопления, были сделаны следующие выводы.

Проанализированы фундаментальные подходы к изучению ламинарных и турбулентных потоков, теории тепломассообмена, а также современные методы решения их задач. Определены актуальные проблемы тепло- и массопереноса в осесимметричных трубах.

Предложена квазиодномерная стационарная нелинейная модель совместного изменения давления, скорости и температуры для инженерных

расчетов, учитывающая линейное изменение диаметра трубы, рельеф трассы трубопровода, теплообмен с окружающей средой и зависимость удельной теплоемкости от температуры.

Данная модель с привлечением квадратичного закона сопротивления позволила изучить особенности изменения скорости и температуры жидкости в различных условиях. В частности, выявлены такие явления, как образование постперевального режима течения при отрицательных значениях угла наклона, формирование изменения давления в вертикальных трубах исключительно под действием силы гравитации, интенсивное изменение температуры по пути следования при малых значениях скорости.

Разработан эффективный численный метод на базе алгоритма SIMPLE для решения осесимметричных уравнений переноса массы, импульса и внутренней энергии. Метод был применен для изучения задачи формирования ламинарного течения на начальном участке трубы.

Результатами расчетов подтверждены особенности объекта: пропорциональность длины начального участка потока числу Рейнольдса; монотонное, двукратное возрастание осевой скорости по отношению к начальной; достижение радиальной скоростью значительного отрицательного значения в начальных сечениях и её постепенное стремление к нулю вдоль потока; а также строгая монотонность изменения температуры на оси течения.

Показана согласованность полученных численных результатов с экспериментальными данными, а также с результатами, полученными с помощью программных комплексов COMSOL и ANSYS Fluent. Установлено, что осцилляции температуры на оси симметрии потока, наблюдаемые в результатах пакетов, успешно устраняются в предложенном нами численном методе. Профиль продольной скорости и значение касательного напряжения в конце начального участка выходят на классические решения.

На основе современной модели турбулентности SST $k - \omega$ была сформулирована и численно решена задача тепло- и массопереноса на начальном участке осесимметричной трубы.

На основе численных экспериментов в турбулентном режиме течения установлено: значительное сокращение начального участка потока; интенсивное перемещение жидкости к оси в начале трубы с последующим частичным возвратом, в результате чего осевая скорость изменяется немонотонно (повторяя неньютоновских жидкостей); увеличение значения осевой скорости в 1,22–1,32 раза по отношению к начальной (причем это значение уменьшается с ростом числа Рейнольдса); а также более интенсивное протекание теплопереноса по сравнению с ламинарным режимом.

Выявлено, что с увеличением числа Рейнольдса вблизи стенки образуются большие градиенты, которые распространяются на всю расчетную область, и происходит интенсификация турбулентного обмена. Подтверждено полное соответствие полученных результатов классическим эмпирическим закономерностям (Блазиуса, Диттуса-Болтера).

Решена и визуализирована сложная задача течения теплоносителя на основе высокоплотной 3D-модели (с более чем из 21 миллиона элементов) современных многосекционных радиаторов. В результате исследования выявлено неравномерное распределение жидкости по секциям радиатора, а также наличие «неэффективных (застойных) зон», снижающих теплообмен. Данные результаты позволяют определять оптимальные геометрические параметры и количество секций радиаторов.

Результаты исследования внедрены в деятельность АО «Вухоро сув та'миноти», что позволило снизить потери давления в магистральных трубопроводах на 3–4%, а потери тепла – на 4–5%.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.05/2025.27.12.T/FM.10.01 AWARDING THE
SCIENTIFIC DEGREE AT THE INSTITUTE OF MECHANICS AND
SEISMIC STABILITY OF STRUCTURES NAMED AFTER M.T.
URAZBAEV UZBEKISTAN ACADEMY OF SCIENCES**

**INSTITUTE OF MECHANICS AND SEISMIC STABILITY OF
STRUCTURES NAMED AFTER M.T. URAZBAEV UZBEKISTAN
ACADEMY OF SCIENCES**

RAVSHANOV SHOHJAXON AKMALJON OGLI

**MATHEMATICAL SIMULATION OF HEAT AND MASS TRANSFER IN
WATER-BASED HEATING SYSTEMS**

01.02.05 – Mechanics of liquid and gas

DISSERTATION ABSTRACT of the doctor of philosophy (PhD)
on PHYSICAL-MATHEMATICAL SCIENCES

Tashkent – 2026

The theme of doctor of philosophy (PhD) in physical-mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under the number B2026.1.PhD/FM1150

The dissertation has been prepared in the Institute of Mechanics and Seismic stability of structures named after M.T.Urazbaev, Uzbekistan Academy of Sciences.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council (<https://institutemechanics.uz>) and on the information- educational portal "ZiyoNet" at the address (www.ziynet.uz.)

Scientific adviser:

Hamdamov Muzaffar Muhiddinovich
doctor of technical sciences, senior researcher

Official opponents:

Maxmudov Jamol Maxmudovich
doctor of physical and mathematical sciences, professor

Hojiyev Safar
doctor of technical sciences, senior researcher

Leading organization:

Digital technologies and artificial intelligence research institute

Defense will take place «__» january ____ at ____ the meeting of the Scientific Council DSc.05/2025.27.12.T/FM.10.01 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T.Urazbaev, Uzbekistan Academy of Sciences (Address 100125, Tashkent, Durman yuli street 40, Conference hall – 428. Tel: (99855) 520-02-45; (99855) 520-04-46, e-mail:instmech@academy.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource center of the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T.Urazbaev, Uzbekistan Academy of Sciences (registration number № 26). (Address: 1000125, Tashkent, st. Durmon Yuli, 40. Tel. (99855) 520-02-45).

Abstract of the dissertation sent out on «__» _____ y.
(mailing report № __ on «__» _____ y.)

M.M.Mirsaidov

Chairman of the Scientific Council
for awarding scientific degrees, doctor
of technic sciences, professor,
academician

F.F.Adilov

Scientific secretary of Scientific Council
for awarding scientific degrees, PhD

Z.M.Malikov

Chairman of the council seminar at the
Scientific Council for the awarding
degrees, doctor of technical sciences

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research is to develop highly efficient mathematical models and numerical methods for describing hydrothermal processes in pipes and heating systems, as well as to investigate the patterns of fluid hydrodynamics and heat transfer under various flow regimes.

The object of the research work is the non-isothermal flow of heat-transfer fluids in constant and variable diameter pipes.

The scientific novelty of the work is as follows:

An improved quasi-one-dimensional unsteady mathematical model has been developed to describe hydrothermal processes in pipes with variable diameters and complex topography.

Mathematical models and efficient numerical methods based on the SIMPLE algorithm were developed for laminar and turbulent flow regimes, accounting for the temperature-dependent variations in dynamic viscosity, thermal conductivity, and specific heat capacity of the fluid.

Using the SST turbulence model, the patterns of flow development under the influence of turbulent diffusion in the pipe entrance region were identified, and faster stabilization of the Nusselt number compared to the laminar regime was scientifically proven.

The impact of temperature fields on flow formation across various regimes was determined, establishing the high computational accuracy and efficiency of the developed algorithms relative to modern CFD software packages.

The adequacy of the developed mathematical models and the results obtained was validated through comparison with empirical formulas (Loitsyanskiy, Blazius, Gnielinski, Dittus-Belter) and results from contemporary software products.

Vortex zones and hydrodynamically inactive (stagnant) areas that reduce heat exchange efficiency in modern heating radiators were identified.

Implementation of research results.

Volume and structure of dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, conclusion, references and appendices. The dissertation volume is 120 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; I part)

1. Khujaev I., Hamdamov M., Ravshanov Sh. Numerical study of heat and mass transfer in a relief pipeline with variable diameter // Mathematical Models in Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 243–258, Dec. 2025, <https://doi.org/10.21595/mme.2025.25173> (№3 Scopus, Q3).
2. Khujaev, I., Mamadaliev, K., Hamdamov, M., Ravshanov, S., Boborakhimova, M., Begimov, O., & Chulliyev, S. (2026). Mathematical Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in the Laminar Entrance Region of a Cylindrical Pipe. *Fluids*, 11(6), 140. <https://doi.org/10.3390/fluids11060140> (№3 Scopus, Q2).
3. Ravshanov Sh.A. Calculation of natural convection and radiator heating with the use of COMSOL Multiphysics // Узбекский журнал: Проблемы механики, Ташкент, 2024, №4. – С. -52. <https://www.academia.edu/172381850> (01.00.00; № 4)
4. Hamdamov M.M., Ravshanov Sh.A., Chulliev Sh. I. Numerical Simulation of Laminar Heat and Mass Transfer in a Cylindrical Channel using a Modified SIMPLE Algorithm. Problems of mechanics. 2026, №1(35): – С.135-147. <https://www.academia.edu/172381958> (01.00.00; № 4)
5. Хужаев И.К., Мамадалиев Х.А., Равшанов Ш.А., Хасанов М.А. Постперевальный режим при стационарном функционировании магистральных газопроводах // Проблемы вычислительной и прикладной математики. Ташкент, 2023, №2(47). – С. 55-63. <https://www.academia.edu/172383313> (01.00.00; № 2)
6. Ravshanov Sh.A., Boborakhimova M.I., Chulliyev Sh.I. Modelling heat and mass transfer in a relief pipeline with constant and varying diameters // Проблемы вычислительной и прикладной математики. Ташкент, 2026, №3(73). – С. 90-103. (01.00.00; №2) <https://journals.airi.uz/index.php/pvpm/article/view/209>
7. Hamdamov M.M., Ravshanov Sh.A., Rahmonova N.N. Mathematical modelling of the time-dependent convection process in radiators // Научный вестник. Андижан, 2025, №7(1). – С. 229-235. <https://fizmatjournal.adu.uz/web/files/files/15.%20texnika.pdf> (01.00.00; № 13)
8. Хамдамов М.М., Мамадалиев Х.А., Равшанов Ш.А. Моделирование и анализ процессов естественной конвекции вокруг теплового радиатора с использованием COMSOL Multiphysics // Научный вестник. Андижан, 2025, №7(1). – С. 223-228. <https://fizmatjournal.adu.uz/web/files/files/2025/2025.7.1.%2836%29.pdf> (01.00.00; № 13)
9. Равшанов Ш.А., Хамдамов М.М., Жумаев Ж. Численное исследование влияния внешних факторов на тепловой поток и потери давления в трубах // Научный вестник Бухарского государственного университета,

Бухара, 2025, №8(1). – С. 89-100.
https://buxdu.uz/media/jurnallar/ilmiy_axborot/1_Aniq_va_tabiiy_fanlar_Lingvisti_ka_Ilmiy_axboroti_8_2025_PDF_c_kPpaIeI.pdf (01.00.00; № 3)

10. Khujaev I., Shirinov Z., Ravshanov Sh. Mathematical Model and Calculation Algorithm Modern Heat Exchanger Connected to a Two-Pipe Heating Network // AIP Conference Proceedings. 3265, 060002 (2025).
<https://doi.org/10.1063/5.0267610> (№3 Scopus).

11. Ravshanov Sh., Aminov Kh., Rahmonova N. Simulation of Flow Dynamics in a Gas Network Pipe // AIP Conference Proceedings. 3265, 060007 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0265131> (№3 Scopus).

II bo'lim (II часть; II part)

12. Хужаев И.К., Мамадалиев Х.А., Хожикулов Ш.Ш., Равшанов Ш.А. Применение метода Фурье для исследования распространения волны уплотнения в трубопроводах с демпфером // Проблемы информатики и энергетики, Ташкент, 2023, №1. – С. 65-75.
<https://www.academia.edu/172383912> (ResearchBib №14)

13. Мамадалиев Х.А., Равшанов Ш.А. Применение законов кирхгофа для расчета двухконтурной сети трубопроводов в стационарном ламинарном режиме течения // Научно-технический и информационно-аналитический журнал ТУИТ. 2022, №2 (62) <https://www.academia.edu/172383967> (ResearchBib №14)

14. Хамдамов М.М., Равшанов Ш.А. Наблюдение процесса естественной конвекции на примере теплового радиатора с использованием Comsol Multiphysics // «Tafakkur va talqin» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi to'plami. Buxoro 2025-yil, 15-may.
https://buxdu.uz/media/tafakkur_va_talqin/Toplam_2025_compressed.pdf

15. I. Khujaev, M. Hamdamov, Sh. Ravshanov Mathematical modeling of hot water flow dynamics inside a radiator // Air Pollution systems and Multiphase Turbulent Flows with Applications. October 06-07, 2025, Tashkent, Uzbekistan, - C.196-204. <https://www.academia.edu/172384037>

16. Xujayev I.K., Shirinov Z.Z., Ravshanov Sh.A. Radiatorlar ketma-ket ulangan issiqlik ta'minoti tarmog'ining gidravlik va teplofizik hisobi. DGU 41130, 2024

17. Ravshanov Sh.A., Mamadaliyev X.A., Begimov O.M., Boboraximova M.I. Kvazi bir o'lchovli yondashuv asosida o'zgaruvchan kesimli doiraviy quvurda barqaror issiqlik va massa ko'chish jarayonlarini hisobi uchun dastur. DGU 50828, 2025

18. Hamdamov M.M., Ravshanov Sh.A., Raxmonova N.N., Yuldosheva O.O., Kamalova S.D., Qurbonova G.F. Parallel simulation software for pipe fluid dynamics and heat transfer. DGU 62923, 2026

Avtoreferatning o'zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari
«Mexanika muammolari» ilmiy jurnali
tahririyatida tahrirdan o'tkazildi

Bosishga ruxsat etildi: