

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ АХБОРОТ-КОММУНИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ
ИЛМИЙ-ИННОВАЦИОН МАРКАЗИ**

БОЛТИБАЕВ ШУХРАТЖОН КОМИЛЖАНОВИЧ

**ДАВРИЙ РЕЖИМДА ИШЛАЁТГАН ЎЗARO БОҒЛИҚ МАГИСТРАЛ
ГАЗ ҚУВУРЛАРИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА
ТАДҚИҚ ЭТИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

**ТЕХНИКА ФАНЛАР БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2018

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора философии (PhD) по техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on technical sciences**

Болтибаев Шухратжон Комилжанович

Даврий режимда ишлаётган ўзаро боғлиқ магистрал газ қувурларини
математик моделлаштириш ва тадқиқ этиш 3

Болтибаев Шухратжон Комилжанович

Математическое моделирование и исследование взаимосвязанных
магистральных газопроводов, функционирующих периодическом
режиме 21

Boltibaev Shukhratjon Komiljanovich

Mathematical modeling and research of the interrelated main gas pipelines
functioning in a periodic mode. 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 43

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ АХБОРОТ-КОММУНИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ
ИЛМий-ИННОВАЦИОН МАРКАЗИ**

БОЛТИБАЕВ ШУХРАТЖОН КОМИЛЖАНОВИЧ

**ДАВРИЙ РЕЖИМДА ИШЛАЁТГАН ЎЗАРО БОҒЛИҚ МАГИСТРАЛ
ГАЗ ҚУВУРЛАРИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА
ТАДҚИҚ ЭТИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

**ТЕХНИКА ФАНЛАР БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.1.PhD/Т61 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион марказида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.tuit.uz) ва "Ziyonet" Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Хўжаев Исматулла Қўшаевич
техника фанлари доктори, катта илмий ходим

Расмий оппонентлар:

Кабулов Анвар Василович
техника фанлари доктори, профессор

Маликов Зафар Маматкулович
техника фанлари доктори, катта илмий ходим

Етакчи ташкилот:

Ирригация ва сув муаммолари илмий-тадқиқот институти

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.Т.07.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темура кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темура кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2018 йил «___» _____ да тарқатилди.
(2018 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

Р.Х.Ҳамдамов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

Ф.М.Нуралиев

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д., доцент

Н.Равшанов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, т.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда математик моделлаштириш ва замонавий инфор­мацион технологиялар асосида нефть ва газ ташиш жараёнларини автоматлаштиришга ва моделлаштиришга катта эътибор қаратилмоқда. British Petroleum маълумотларига кўра, «охирги ўн йилликда газ истеъмоли дунёда ўртача 2,5 % га, яъни 63 млрд куб метрга ортган. Хусусан, Марказий Осиёда (19 млрд куб м - 3,5%га) ва Хитойда (16 млрд куб м - 7,7%га) газ истеъмоли ўсгани қайд этилди»¹. Шу жиҳатдан газ ташиш жараёнлари учун инновацион ғоялар асосида янги математик моделлар ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш муҳим аҳамият касб этади.

Жаҳонда замонавий инфор­мацион технологиялар асосида магистрал газ қу­вури орқали табиий газ ташиш жараёнида газ ташиш параметрларини аниқлаш, газ қу­вури диаметри, ишчи босим, компрессор станцияларининг жойлашини аниқлаш, магистралларнинг оптимал йўналишларини танлаш учун математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалар ишлаб чиқишга доир мақсадли тадқиқотлар олиб борилмоқда. Газ ташиш тизимларини ҳисоблаш, хусусан, газ ташиш жараёнига ташқи муҳит ҳароратинининг таъсири ва газ истеъмоли ноте­кисликларини ҳисобга олган моделлар ва алгоритмларни ишлаб чиқиш ҳамда мавжуд моделларни такомиллаштириш муҳим вазифалардан ҳисобланади.

Республикамизда янги инновацион технологиялар ёрдамида газ узатиш тармоқларини ҳисоблаш, уларнинг фаолиятини таҳлил этиш, башоратлаш, лойиҳалаштириш ва бошқариш учун математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалар ишлаб чиқишга қаратилган чора­тадбирлар амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан « ... иқтисодиётда энергия ва ресурслар сарфини камай­тириш, ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий этиш, ... иқтисодиёт, ижтимоий соҳа, бошқарув тизими­га ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш»² вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни бажариш, хусусан энергиянинг асосий манбаларидан бири бўлган газ ташиш ва қайта ишлаш тизимларини башоратлаш, фаолиятини таҳлил этиш ва тезкор бошқаришда газ истеъмоли ҳажми ва ташқи муҳит ҳароратини суткалик ноте­кислигининг математик моделлари, сонли-аналитик усуллари ва ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йилнинг 29 ноябрдаги

¹ <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/natural-gas/natural-gas-consumption.html>

² Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони

ПФ-5264-сон «Ўзбекистон Республикаси Инновацион ривожланиш вазирлигини ташкил этиш тўғрисида»ги Фармони, 2018 йил 21 ноябрдаги ПҚ-4024-сон «Ахборот технологиялари ва коммуникацияларининг жорий этилишини назорат қилиш, уларни ҳимоя қилиш тизимини такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2017 йил 30 июндаги ПҚ-3107-сон «Нефть-газ соҳасининг бошқарув тизимини такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари, Вазирлар Маҳкамасининг 2018 йил 20 апрелдаги 297-сон «Ўзбекистон Республикаси Ҳукуматининг айрим қарорларига ўзгартириш ва қўшимчалар киритиш тўғрисида»ги қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Газ ташиш тизимларини ҳисоблаш, таҳлил этиш, лойиҳалаштириш, башоратлаш ва бошқариш учун математик моделлаштириш, алгоритмлар ва дастурий воситалар ишлаб чиқиш бўйича сўнгги йилларда А.Кангас, Е.Карлссон, А.А.Чемерис, С.А.Бобровский, М.А.Гусейнзаде, П.Ф.Водяник, В.В.Грачев, С.Г.Шербаков, Е.И.Яковлев, М.Г.Анучин, Ю.П.Коротаев, В.С.Кулик, А.З.Миркин, В.В.Усиньш, В.В.Алешин, С.Н.Прялов, Е.В.Сеннова, В.Г.Сидлер, И.А.Чарний, В.И.Панферов, Н.Н.Ермолаева, С.А.Коршунов, А.М.Чионов, Р.А.Штиков, В.А.Гасилов, Е.В.Врагова, В.Е.Селезнев ва бошқа чет эл олимлари илмий тадқиқот олиб борган. Улар статик режимда фаолият юритаётган электр тармоқлари, иссиқлик, газ ва сув таъминоти тармоқларини лойиҳалаштириш, фаолиятини таҳлил этиш, иқтисодий баҳолаш ва тезкор бошқарув масалаларини ечиш ҳамда совуқ ва иссиқ ҳарорат шароитида, турли рельефлар орқали ёки сув ҳавзаларидан ўтувчи магистралларни ҳисоблаш учун моделлар ва алгоритмлар ишлаб чиқиш билан ўз ҳиссаларини қўшган.

Жумладан, ўзбек олимлари Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Р.Садуллаев, И.Қ.Хўжаев, И.Х.Вагапов, Н.З.Зайниев ва бошқалар томонидан статик режимда фаолият юритаётган магистраль газ қувурларининг нурсимон тармоғининг кўп бўғинлилигини, параллел қувурлари сони ва гидравлик кўрсаткичлари ўзгаришини ҳамда марказлашган газ олиш/қўшишни ҳисобга олган ҳолда гидравлик ҳисоблашлар учун ягона формула ишлаб чиқилган.

Ҳозирги кунда ўзаро боғлиқ магистрал газ қувури тармоғи фаолиятида газ ҳайдаш ва олиш/қўшишнинг ҳисобига суткалик (даврий) нотекислиги ҳамда ташқи муҳит ҳароратининг суткалик даврий таъсирини ҳисобга олган математик моделлар, сонли-аналитик усуллар ва алгоритмлар ишлаб чиқиш етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан

боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион маркази илмий-тадқиқот ишлари режасининг №ФА-Ф1-Ф010+Ф016 «Мураккаб тизим ва жараёнларни моделлаштириш ва бошқаришнинг фундаментал муаммолари» (2007-2011) ва №Ф4-ФА-Ф005 «Мураккаб чегарали соҳалар учун математик физиканинг кўп ўлчовли нозик синф масалаларининг моделларини такомиллаштириш ҳамда ечишнинг алгоритмик усулини яратиш ва тадқиқ қилиш» (2012-2016) мавзуларидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади даврий режимда чегаравий шартларнинг турли берилишида магистраль газ қувурининг гидравлик параметрларини ҳисоблаш учун математик моделлар, сонли-аналитик усуллар ва дастурий воситалар ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

магистраль газ қувури (МГҚ) тармоғи ва чизиқли қисмининг чегаравий ва ички шартларини Фурье қатори кўринишида тасвирлаш алгоритминини ишлаб чиқиш;

атроф муҳит ҳароратининг даврий ўзгаришининг МГҚ чизиқли қисми газодинамик кўрсаткичларига таъсири жараёнининг математик моделини ишлаб чиқиш;

даврий чегаравий шартларнинг турлича берилишида магистраль газ қувури чизиқли қисмининг газодинамик ҳолати ҳақидаги бошланғич шартсиз масалаларни математик моделини ишлаб чиқиш;

газ қувурида чекли сондаги марказлашган газ олиш ва қўшишларнинг ўзгарувчан жадалликларини ҳисобга олган ҳолда телескопик кўп бўғинли газ қувурининг гидравлик ҳисоби учун алгоритм ишлаб чиқиш;

сонли тажриба ўтказиш учун магистраль газ қувури тармоғи ҳамда чизиқли қисмининг гидравлик параметрларини ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида даврийликнинг турли шароитларида фаолият кўрсатаётган газ транспорти тизимларининг газодинамик кўрсаткичлари олинган.

Тадқиқотнинг предметини газ узатиш тизимлари даврий режимдаги фаолиятини таҳлил этиш ва тезкор бошқариш учун математик моделлар, сонли алгоритмлар ва дастурий воситалар ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида физиканинг умумий қонунларидан, мураккаб тизимларни математик моделлаштириш, математик физика, комплекс ўзгарувчилик функциялар назарияси усулларидан, сонли усуллардан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

қувур орқали узатилаётган газ ҳарорати ўзгаришининг математик модели атроф муҳит ҳароратининг суткалик синусоидал ўзгаришини ҳисобга олиш асосида такомиллаштирилган;

газ истеъмолининг суткалик даврий ўзгариши ҳолида магистраль газ қузури чизикли қисми учун чегаравий шартлар берилишининг турли комбинацияларига мос масалаларининг математик модели ишлаб чиқилган;

изотермик режимдаги телескопик магистраль газ қузури тармоғининг газодинамик кўрсаткичларини аниқлаш учун чегаравий ва ички шартлар даврий берилишининг турли комбинацияларига мос ягона ҳисоб алгоритми ишлаб чиқилган;

жадвал кўринишидаги ва бир ёки кўп поғонали қисмлардан ташкил топган функцияларни Фурье қаторлари шаклида ифодаловчи самарали сонли алгоритм ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

магистрал газ қузури кириши ва чиқишдаги газ босими, масса сарфи ва олиш/қўшишлар жадаллигини Фурье қатори кўринишида ифодалаш учун жадвал ёки қисм-функциялар кўринишидаги даврий функцияларни Фурье қаторига ёйиш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

қувур орқали узатилаётган газ ҳароратига ташқи муҳит ҳароратининг синусоидал ўзгариши таъсирини максимал қиймати сутканинг 16-соатига тўғри келиши ва бу вақтда энг кўп энергия йўқотилиши аниқланган;

чегаравий ва ички шартларнинг турлича даврий режимда берилиши учун кўп бўғинли телескопик магистрал газ қузури тармоғини ҳисоблаш алгоритми ва дастурий таъминоти ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги фойдаланилган тенгламаларнинг масса, импульс ва энергия сақланишининг умумий қонунлари асосида қурилганлиги, фойдаланилган ечиш усуллари кўп сонли масалаларни ечишда муқаддам синовдан ўтказилганлиги билан асосланади; газ босими ва сарфи учун чегараларга мос тўрт функция комплексининг ягоналиги ҳақидаги тасдиқлар исботланганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти ички ва ташқи омиллар ҳисобга олинган ҳолда магистраль газ қувурларида кечадиган даврий жараёнларни математик ва сонли моделлаштириш усуллариининг ишлаб чиқилиши ва ривожлантирилиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти газ узатиш тизимларини лойиҳалаш ва оптимал бошқаришда газ ҳарорати оптимал қийматини аниқлаш, компрессор станциясининг қўшимча ускуналарининг ишга тушириш режимларини аниқлаш учун зарур бўлган ахборот таъминоти яратилиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Чизикли ва кўп бўғинли магистраль газ қувурлари орқали газ узатиш жараёнини ҳисоблаш учун ишлаб чиқилган модель, алгоритм ва дастурий воситалар асосида:

газ қузури тармоғи ва унинг чизикли қисмларининг параметрларини ҳисоблаш бўйича «Динамик режимдаги телескопик магистрал газ қувурининг турлича ички ва чегаравий шартларини ҳисобга олиб газ сарфи ва босимини суткалик ўзгаришини ҳисобловчи дастур», «Ресивер

ўрнатилган, даврий режимда фаолият кўрсатаётган магистрал газ қувурининг элементар қисмида газ сарфи ва босимининг ўзгаришини ҳисобловчи дастур», «Даврий режимдаги магистрал газ қувурининг элементар қисмида инерция кучини ҳисобга олган ҳолда газ сарфи ва босимининг ўзгаришини ҳисобловчи дастур» яратилган дастурий воситаларни фойдаланиш мумкинлиги тўғрисида «UNICON.UZ» ДУК томонидан хулоса берилган («UNICON.UZ» ДУКнинг 2018 йил 9 октябрдаги хулосаси). Натижада газ қувури тармоғи ва унинг чизиқли қисмларини параметрларини ҳисоблаш алгоритмлари асосида яратилган дастурий таъминот газ ташиш тизимлари оптимал режимларини ишлаб чиқиш имкони яратилган;

кўп бўғинли газ қувури учун бўғинлар гидравлик кўрсаткичлари, оралик нуқталардаги газ олиш/қўшишнинг жадалликлари берилганида газ босими ва масса сарфини аниқлаш алгоритми асосида яратилган дастурий восита Ўзбекистон нефть ва газ саноати амалиётига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 11 апрелдаги 33-8/2533-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида динамик режимда фаолият юритаётган газ ташиш тизимининг иш режимини аниқлаш, магистраль газ қувурини гидравлик ҳисоб қилиш ва оптимал бошқаришда компрессор станцияси ускуналарини ишга тушириш ва ўчириш режимларини аниқлашда меҳнат сарфини 9,5%га камайтириш имконини берган;

атроф муҳит ҳароратининг синусоидал ўзгариши туфайли қувур орқали узатилаётган газ ҳароратининг ўзгаришини ҳисоблаш алгоритми «ЎзЛИТИнефтегаз» ОАЖ мутахассислари томонидан қувурлар тизимларини ҳисоблаш жараёнида жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 11 апрелдаги 33-8/2533-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида қувур орқали ташилаётган табиий газнинг термодинамик кўрсаткичларини аниқлаш ва гидравлик ҳисоблашлар ўтказиш учун автоматик ишчи ўрин ташкил этиш жараёнида меҳнат унумдорлигини орттириш имконини берган;

даврий чегаравий шартларнинг турлича берилишида магистраль газ қувури чизиқли қисмининг газодинамик кўрсаткичларини аниқлаш алгоритми ва дастурий восита «Самарқандшаҳаргаз» муҳандис мутахассислари билан биргаликда газ ташиш тизимлари газодинамик кўрсаткичларини аниқлашда жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 11 апрелдаги 33-8/2533-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида газ қувури фаолиятини самарали бошқариш, компрессор станция ускуналарини ишга тушириш ва ўчириш режимларини аниқлаш, ўзаро боғлиқ чизиқли қисмлар гидравлик параметрларини тезкор аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 11 та халқаро ва 10 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот мавзуси бўйича жами 36 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон

Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақола (3 таси хорижий журналларда) чоп этилган ҳамда 3 та ЭҶМ учун яратилган дастурий воситаларни қайд қилиш гувоҳномалари олинган.

Диссертациясининг тузилиши ва ҳажми. Диссертация иши кириш, тўрт боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 113 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг республика фани ва технологиялари тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари белгилаб олинган ҳамда тадқиқот объекти ва предмети аниқланган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, ишнинг янгиликлари, назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этилганлик ҳолати ҳамда нашр этилган ишлар ва диссертация ишининг тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Қувурлар фаолиятини моделлаштиришга доир адабиётлар таҳлили**» деб номланган биринчи боби тўрт параграфдан иборат ва асосан охириги ўн беш йилда чоп этилган илмий манбааларнинг таҳлили ва тадқиқот вазифаларига бағишланган.

1.1-параграфда турли омилларни ҳисобга олган ҳолда магистраль газ қувурларини математик моделлаштиришга доир адабиётлар таҳлил этилган.

1.2-параграфда газ узатиш тизимларини сонли моделлаштириш, чизиклаштириш, квазичизиклаштириш, параметрларни ўрталаштириш ва бошқа ёндашувларга доир ютуқлар таҳлил этилган.

1.3-параграфда қувурлар газодинамик кўрсаткичларининг даврийлигига бағишланган илмий манбаалар муҳокама этилган. Газ транспорти тармоқлари учун моделлаштириш, алгоритмлаштириш ва дастурий воситалар яратиш соҳасидаги адабиётлар таҳлилидан келиб чиққан ҳолда фундаменталь ва амалий тадқиқотларни ривожлантиришга хизмат қилувчи қуйидаги муаммоларнинг долзарблиги аниқланган:

объектларни тадқиқ этиш жараёнида ички ва ташқи омиллар таъсирини ҳисобга олиш керак бўлган ўзаро боғлиқ магистрал газ қувурларининг фаолиятини умумий усулларини таҳлил қилиш ва аниқлаш;

тадқиқ этилаётган тизимларда жараёнларнинг кўп ўлчовлилиги, кўп фазалилиги, кўп компоненталиги ва ностационарлигини ҳисобга олган математик моделлар ва ахборот таъминоти ишлаб чиқиш;

муайян объектларнинг математик моделларини ечиш учун сонли-аналитик усуллар ишлаб чиқиш ва мавжуд ҳисоблаш алгоритмларини такомиллаштириш;

анъанавий ҳисоблаш схемалари билан янги ҳисоблаш моделлари ва алгоритмларнинг самарадорлиги бўйича таққослаш таҳлилларини ўтказиш,

янги фундаментал ва амалий тадқиқотлар йўналишларини ривожлантириш бўйича тавсиялар бериш.

1.4-параграфда қувур элементар қисми учун ташқи муҳит ҳароратини сутка давомида даврий ўзгариши узатилаётган газ ҳароратига таъсири ва газ олиш ҳажмининг даврий ўзгариши, ҳамда магистраль қувур тармоғининг газ олиш/қўшишнинг нотекислиги ҳисобга олинганда масалаларнинг қўйилиши асосланган. Ушбу масалаларни шакллантиришда импульс, масса ва энергия сақланиши, ҳамда реал газ ҳолати тенгламаларидан фойдаланилган.

Диссертациянинг «**Атроф муҳит ҳарорати ва кириш, чиқиш кўрсаткичларининг суткалик ўзгаришлари ҳисобга олинган ҳолда магистраль газ қувури чизикли қисмининг газодинамик кўрсаткичлари масалаларининг аналитик ечимлари**» деб номланган иккинчи боби уч параграфдан иборат.

Маълумки, қувур орқали узатилаётган газнинг юқори ҳарорати босимнинг катта йўқотилишларига, паст ҳарорати эса конденсатлар ва гидратлар ҳосил бўлишига олиб келади. Шу туфайли 2.1-параграфда қувурни ўраб турган муҳитда ҳароратнинг суткалик ўзгариши туфайли газ ҳароратининг йўл-йўлакай ўзгариши масаласи қаралган.

Газ ҳарорати $T(x,t)$ ўзгариши қуйидаги тенглама билан тавсифланди:

$$\frac{\partial c_p T}{\partial t} + \frac{Q}{F} \frac{\partial c_p T}{\partial x} + \frac{4k_c}{D} (T - T_{oc}) = 0.$$

Бунда D , $F = \pi D^2/4$ – газ қувури диаметри ва кўндаланг кесими юзаси; k_c – тизимда иссиқлик алмашинувини ифодаловчи коэффицент; c_p – босимнинг ўзгармас қийматидаги газ солиштирма иссиқлик сифими; $M = \rho w F$ – газ масса сарфи; ρ, w – газ зичлиги ва тезлиги. Грунт ҳарорати $T_{oc}(t) = T_0 + \Delta T \sin \omega t$ синусоидал функция билан ифодаланган: $\omega = 2\pi/84600 \text{ c}^{-1}$; T_0 – грунтнинг ўртача суткалик ҳарорати; ΔT – грунт ҳарорати ўзгаришининг амплитудаси.

$c_p = const$ ҳоли учун қуйидаги аналитик ечим олинди:

$$T(x,t) = T_0 + (T_n - T_0)e^{-fx} + \frac{d}{\theta\sqrt{b}} \left[e^{-fx} \cos(\omega t - \theta x + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi) \right].$$

Бунда $f = \frac{k_c \pi D}{c_p Q}$, $\varphi = \text{arctg}(f/\theta)$, $b = f^2 + \theta^2$, $d = f\theta\Delta T$, $\theta = F\omega/Q$.

Ушбу ечимнинг биринчи икки қўшилувчилари В.Г.Шуховнинг формуласини ифодалайди. Шу сабабли олинган ечимни В.Г.Шухов формуласининг атроф муҳит ҳарорати синусоидаль ўзгариши ҳоли учун такомиллашган кўриниши дейиш мумкин.

2.2-параграфда магистрал газ қувури чизикли қисми учун газ истеъмоли ва дамланиши нотекислигининг газ статик босими p ва масса сарфи $M = \rho w F$ учун қуйидаги олти даврий чегаравий шартга мос бошланғич шартсиз масалаларнинг аналитик ечимлари олинган:

$$\text{I вариант: } p_H = \bar{N}(t), \quad p_K = \tilde{N}(t);$$

$$\text{II вариант: } M_H = \bar{N}(t), \quad M_K = \tilde{N}(t);$$

$$\text{III вариант: } p_H = \bar{N}(t), \quad M_K = \tilde{N}(t);$$

$$\text{IV вариант: } M_H = \bar{N}(t), \quad p_K = \tilde{N}(t);$$

$$\text{V вариант: } M_H = \bar{N}(t), \quad p_H = \tilde{N}(t);$$

$$\text{VI вариант: } M_K = \bar{N}(t), \quad p_K = \tilde{N}(t).$$

Импульс сақланиши тенгламасида фақат қаршилик кучи ҳисобга олинганида газ қувури элементар қисми учун тенгламалар қуйидагича бўлди:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda |w|}{2D} \rho w = 0, \quad \frac{\partial \rho w}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad p = Z \rho R T. \quad (1)$$

Мисол тариқасида V вариант масаланинг ечимини келтирамизки, унда қисмга кириш чегаравий шартлари Фурье қатори кўринишида берилади:

$$p(0,t) = \zeta_0 + \sum_{m=1} (\xi_m \sin \omega_m t + \zeta_m \cos \omega_m t), \quad (2)$$

$$M(0,t) = v_0 + \sum_{m=1} (\mu_m \sin \omega_m t + v_m \cos \omega_m t). \quad (3)$$

Ишқаланиш қаршилиги коэффиценти λ , таснифли тезлик w_* ($|w| \approx w_*$ – чизиклаштириш параметри), қувур диаметри D , кичик кўзғалишлар тарқалиши тезлиги c , ўта сиқилувчанлик коэффиценти Z , газ доимийси R ва абсолют ҳарорат T берилган ва уларнинг қийматлари ўзгармас деб қараймиз. Қисм узунлиги l ни ташкил этади. Мос циклик частоталар $\omega_m = 2\pi m / T_{per}$ деб қабул қилинди ва T_{per} – кўзғалишлар даври (суткалик ўзгаришлар учун $T_{per} = 84600$ с).

Ечимнинг (1)–(3) дан аниқланувчи стационар қисми, $\lambda_* = \lambda w_* / (2D)$ бўлганида, қуйидагича аниқланди: $M_{CT} = v_0$, $p_{CT}(x) = \zeta_0 - \frac{\lambda_*}{F} v_0 x$.

Масаланинг даврий ечимини олиш учун система (1) ни статик босимга нисбатан $\frac{\partial p}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ ва масса сарфига нисбатан $\frac{\partial M}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$ параболик тенглама тарзида ёзиб оламиз (бунда $a^2 = 2Dc^2 / (\lambda w_*) = const$).

Дастлаб масалани масса сарфи ва босимга нисбатан муайян частота ω_m учун ечиб оламиз ва кейин m нинг барча қийматлари учун уларнинг йиғиндисини ҳисоблаб, ностационар ечимни топамиз.

Кириш сарфининг бирлик амплитудали $\cos \omega_m t$ га мос қийматининг масса сарфидаги улуши комплекс функция кўринишида қидирилади:

$$\bar{M}_m(x,t) = e^{-i\omega_m t} \bar{K}_m(x).$$

$e^{-i\omega_m t} = \cos \omega_m t - i \sin \omega_m t$ ҳисобга олинса, комплекс $\bar{M}_m(x,t)$ ечимнинг ҳақиқий қисми $\cos \omega_m t$ учун, мавҳум қисми $-\sin \omega_m t$ учун ечимлиги аниқланади.

Чегаравий шартларга кўра ечим қуйидагича бўлади:

$$\bar{K}_m(x) = \cos \gamma_m x = \cos(\theta_m + i\theta_m)x = \cos \theta_m x \operatorname{ch} \theta_m x - i \sin \theta_m x \operatorname{sh} \theta_m x = \bar{R}_{K,m}(x) + i\bar{I}_{K,m}(x).$$

Унга кўра муайян ω_m частотага мос масса сарфининг қисми

$$\begin{aligned} \bar{M}_m(x,t) &= e^{-i\omega_m t} \bar{K}_m(x) = (\cos \omega_m t - i \sin \omega_m t) [\bar{R}_{K,m}(x) + i\bar{I}_{K,m}(x)] = \\ &= [\bar{R}_{K,m}(x) \cos \omega_m t + \bar{I}_{K,m}(x) \sin \omega_m t] + i[-\bar{R}_{K,m}(x) \sin \omega_m t + \bar{I}_{K,m}(x) \cos \omega_m t] \end{aligned}$$

ни ташкил этади.

Кириш босимининг масса сарфидаги улушини аниқлаш учун (2) шартни система (1) нинг иккинчи тенгламаси ёрдамида ўзгартирамиз:

$$\frac{\partial \tilde{M}_m(0,t)}{\partial x} = -\frac{F}{c^2} \frac{\partial \tilde{p}_m(0,t)}{\partial t} = \frac{F\omega_m}{c^2} \zeta_m \sin \omega_m t - \frac{F\omega_m}{c^2} \xi_m \cos \omega_m t. \quad (4)$$

Ечимни $\tilde{M}_m(x,t) = e^{-i\omega_m t} \tilde{K}_m(x)$ кўринишида кидирамиз. (4) шартга кўра:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_m(x) &= \frac{\sin(\theta_m + i\theta_m)x}{\theta_m + i\theta_m} = \frac{1}{2\theta_m} (\sin \theta_m x \operatorname{ch} \theta_m x + \cos \theta_m x \operatorname{sh} \theta_m x) + \\ &+ \frac{i}{2\theta} (-\sin \theta_m x \operatorname{ch} \theta_m x + \cos \theta_m x \operatorname{sh} \theta_m x) = \tilde{R}_{K,m}(x) + i\tilde{I}_{K,m}(x). \end{aligned}$$

Бирлик амплитудали босим ўзгаришининг масса сарфидаги улушини топамиз:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_m(x,t) &= e^{-i\omega_m t} \tilde{K}_m(x) = (\cos \omega_m t - i \sin \omega_m t) [\tilde{R}_{K,m}(x) + i\tilde{I}_{K,m}(x)] = \\ &= [\tilde{R}_{K,m}(x) \cos \omega_m t + \tilde{I}_{K,m}(x) \sin \omega_m t] + i[-\tilde{R}_{K,m}(x) \sin \omega_m t + \tilde{I}_{K,m}(x) \cos \omega_m t]. \end{aligned}$$

Улушларни жамлаш ва соддалаштириш орқали масса сарфи учун ечимни топамиз:

$$\begin{aligned} M_m(x,t) &= \left[v_m \bar{R}_{K,m}(x) - \mu_m \bar{I}_{K,m}(x) - \frac{F\omega_m}{c^2} \xi_m \tilde{R}_{K,m}(x) - \frac{F\omega_m}{c^2} \zeta_m \tilde{I}_{K,m}(x) \right] \cos \omega_m t + \\ &+ \left[v_m \bar{I}_{K,m}(x) + \mu_m \bar{R}_{K,m}(x) - \frac{F\omega_m}{c^2} \xi_m \tilde{I}_{K,m}(x) + \frac{F\omega_m}{c^2} \zeta_m \tilde{R}_{K,m}(x) \right] \sin \omega_m t. \end{aligned} \quad (5)$$

ω_m частота учун амалларни такрорлаб, газ босими учун ечимни оламиз:

$$\begin{aligned} p_m(x,t) &= \left[\zeta_m \bar{R}_{K,m}(x) - \xi_m \bar{I}_{K,m}(x) - \frac{\lambda_*}{F} v_m \tilde{R}_{K,m}(x) + \frac{\lambda_*}{F} \mu_m \tilde{I}_{K,m}(x) \right] \cos \omega_m t + \\ &+ \left[\zeta_m \bar{I}_{K,m}(x) + \xi_m \bar{R}_{K,m}(x) - \frac{\lambda_*}{F} v_m \tilde{I}_{K,m}(x) - \frac{\lambda_*}{F} \mu_m \tilde{R}_{K,m}(x) \right] \sin \omega_m t. \end{aligned} \quad (6)$$

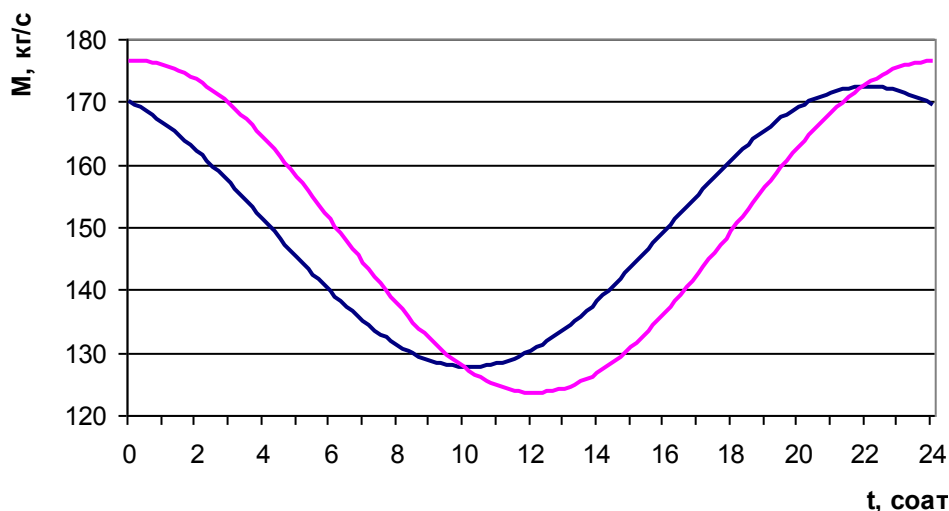
Шунга ўхшаш ечимлар қолган беш вариант масалалар учун ҳам олинган.

2.3-параграфда масалаларнинг турлича қўйилишида ечимларнинг эквивалентлиги исботланган: босим ва газ сарфининг қисмга кириш ва ундан чиқишдаги функциялар комплексидан ихтиёрий икkitаси берилганида ечим комплекснинг қолган икки функциясини ташкил этади.

Масса сарфининг киришдаги (берилган) ва чиқишдаги (топилган) типик ўзгаришлари 1-расмда келтирилган.

Статик ечимларнинг эквивалентлиги аналитик усулда исботланди ва сонли натижалар билан тасдиқланди. Даврий қисмларнинг эквивалентлиги ҳисоблаш тажрибаси ёрдамида тасдиқланди. Барча ҳолларда солиштириш

натижалари келтирилган бирликларда фарқнинг 10^{-5} дан ортмаслигини кўрсатди.



1-расм. Масса сарфининг узунлиги $L = 50$ км бўлган қисм боши ва охиридаги даврий ўзгариши. $D = 0.992$ м, $\lambda = 0.01$, $w_* = 10$ м/с, $c = 200$ м/с.

Ишнинг учинчи боби «Чегаравий ва ички шартларнинг суткалик ўзгаришида магистраль газ қувурлари тармоғини ҳисоблаш учун сонли-аналитик усуллар ва ҳисоб алгоритмларини ишлаб чиқиш» тўрт параграфдан иборат.

3.1-параграфда Н.Е.Жуковский тенгламалари ёрдамида n -элементар қисмнинг динамик ҳолати моделлаштирилган:

$$\frac{\partial p_n}{\partial x} + \frac{2a_n}{F_n} M_n = 0, \quad \frac{\partial M_n}{\partial x} + \frac{F_n}{c^2} \frac{\partial p_n}{\partial t} = 0,$$

бунда газ босими p_n ва масса сарфи M_n вақт t ва масофа x дан боғлиқ равишда ўзгаради. Ўзгармас $2a_n$ қисмда босим тушиши қонуниятини таснифлайди; $F_n = \pi D_n^2 / 4$ – қисм кўндаланг кесими юзаси.

Бошланғич шартларсиз ва чегара шартларнинг қисмга киришда газ босими ва сарфи Фурье қатори кўринишида берилиши ҳолини қараш билан чекланамиз ва иккинчи бобда берилган мос ечим асосида магистралнинг n -бўғинининг охири учун ечимни ёзиб оламиз.

Ечимнинг стационар қисми учун

$$P_{CTn,0}(l_n, t) = \zeta_{n-1,0} - \frac{\lambda_n w_* l_n}{2D_n F_n} v_{n-1,0} = const, \quad M_{CTn,0}(l_n, t) = v_{n-1,0} = const,$$

муайян ω_m ($m = 1, 2, \dots$) гармоника учун (5)-(6) га ўхшаш ечимлар олинди.

ω_m учун ечим коэффициентлари вектор кўринишида $W_{n,m} = (\zeta_{n,m}, \xi_{n,m}, v_{n,m}, \mu_{n,m})^T$ ёзиб олинади ($(\cdot)^T$ матрицани транспонирлаш амалини англатади). У ҳолда n -бўғиннинг кириши ва чиқишидаги кўрсаткичлар орасидаги муносабат қуйидагича бўлади:

$$W_{n,m} = A_{n,m} \overset{\circ}{W}_{n-1,m};$$

бунда

$$A_{n,m} = \begin{pmatrix} a_{1,1}^{n,m} & a_{2,1}^{n,m} & a_{1,3}^{n,m} & a_{1,4}^{n,m} \\ a_{1,2}^{n,m} & a_{2,2}^{n,m} & a_{2,3}^{n,m} & a_{2,4}^{n,m} \\ a_{1,3}^{n,m} & a_{3,2}^{n,m} & a_{3,3}^{n,m} & a_{3,4}^{n,m} \\ a_{1,4}^{n,m} & a_{4,2}^{n,m} & a_{4,3}^{n,m} & a_{4,4}^{n,m} \end{pmatrix} = \|a_{i,j}^{n,m}\|,$$

$$a_{1,1}^{n,m} = \bar{R}_{Kn,m}(l_n), a_{1,2}^{n,m} = -\bar{I}_{Kn,m}(l_n), a_{1,3}^{n,m} = -\frac{\lambda_{*n}}{F_n} \tilde{R}_{Kn,m}(l_n), a_{1,4}^{n,m} = \frac{\lambda_{*n}}{F_n} \tilde{I}_{Kn,m}(l_n),$$

$$a_{2,1}^{n,m} = \bar{I}_{Kn,m}(l_n), a_{2,2}^{n,m} = \bar{R}_{Kn,m}(l_n), a_{2,3}^{n,m} = -\frac{\lambda_{*n}}{F_n} \tilde{I}_{Kn,m}(l_n), a_{2,4}^{n,m} = -\frac{\lambda_{*n}}{F_n} \tilde{R}_{Kn,m}(l_n),$$

$$a_{3,1}^{n,m} = -\frac{F_n \omega_m}{c^2} \tilde{I}_{Kn,m}(l_n), a_{3,2}^{n,m} = -\frac{F_n \omega_m}{c^2} \tilde{R}_{Kn,m}(l_n), a_{3,3}^{n,m} = \bar{R}_{Kn,m}(l_n), a_{3,4}^{n,m} = -\bar{I}_{Kn,m}(l_n),$$

$$a_{4,1}^{n,m} = \frac{F_n \omega_m}{c^2} \tilde{R}_{Kn,m}(l_n), a_{4,2}^{n,m} = -\frac{F_n \omega_m}{c^2} \tilde{I}_{Kn,m}(l_n), a_{4,3}^{n,m} = \bar{I}_{Kn,m}(l_n), a_{4,4}^{n,m} = \bar{R}_{Kn,m}(l_n),$$

$$\bar{R}_{Kn,m}(x) = \cos \theta_{n,m} x \operatorname{ch} \theta_{n,m} x, \tilde{R}_{Kn,m}(x) = \frac{1}{2\theta_{n,m}} (\sin \theta_{n,m} x \operatorname{ch} \theta_{n,m} x + \cos \theta_{n,m} x \operatorname{sh} \theta_{n,m} x),$$

$$\bar{I}_{Kn,m}(x) = -\sin \theta_{n,m} x \operatorname{sh} \theta_{n,m} x, \tilde{I}_{Kn,m}(x) = (-\sin \theta_{n,m} x \operatorname{ch} \theta_{n,m} x + \cos \theta_{n,m} x \operatorname{sh} \theta_{n,m} x),$$

$$\theta_{n,m} = \sqrt{\omega_m / 2a_n^2}, a_n^2 = \frac{2D_n c^2}{\lambda_n w_{*n}}, w_{*n} - n\text{-бўғиннинг таснифли тезлиги.}$$

$A_{n,m}$ матрицанинг биринчи икки қатори босимга, охириги икки қатори эса масса сарфига тегишли; тоқ қаторлар $\cos \omega_m t$ га, жуфт қаторлар эса $\sin \omega_m t$ га тааллуқли.

n -бўғиннинг охиридаги газ олиш/қўшиш ҳисобига $n+1$ -бўғин кириши учун вектор кўрсаткич қуйидагича бўлади:

$$\overset{\circ}{W}_{n,m} = W_{n,m} + \bar{\alpha}_{n,m},$$

бунда $\bar{\alpha}_{nm} = (0, 0, b_3^{n,m}, b_4^{n,m})^T$ масса сарфи учун олиш/қўшиш жадаллигининг синус- ва косинус-компонентлари; $b_3^{n,m} = \beta_{n,m}$, $b_4^{n,m} = \alpha_{n,m}$.

Биринчи бўғинга кириш $p_{CT1}(0) = \zeta_{0,0}$ ва $M_{CT1}(0) = v_{0,0}$ ($= v_{0,0}$) билан бўғин охири $\zeta_{1,0} = \zeta_{0,0} - \frac{\lambda_{*1} l_1}{F_1} v_{0,0}$, $v_{1,0} = v_{0,0}$ лар билан аниқланди.

Биринчи бўғин охиридаги олиш/қўшиш жадаллиги $\beta_{1,0}$ ни ҳисобга олганда, иккинчи бўғин киришида $\zeta_{1,0} = \zeta_{0,0} - \frac{\lambda_{*1} l_1}{F_1} v_{0,0}$, $v_{1,0} = v_{1,0} = v_{0,0} + \beta_{1,0}$ га эга бўламиз. Унда иккинчи бўғин охирида кўрсаткичлар қуйидагича бўлади:

$$\zeta_{2,0} = \zeta_{1,0} - \frac{\lambda_{*2} l_2}{F_2} v_{1,0} = \zeta_{0,0} - \frac{\lambda_{*1} l_1}{F_1} v_{0,0} - \frac{\lambda_{*2} l_2}{F_2} (v_{0,0} + \beta_{1,0}) \quad v_{2,0} = v_{1,0}.$$

Ва ҳ.к.

N -бўғин охири учун, $\Lambda_n = \frac{\lambda_n w_{*n} l_n}{2D_n F_n}$ десак, қуйидагиларни оламиз:

$$\zeta_{N,0} = \zeta_{0,0} - v_{0,0} \sum_{n=1}^N \Lambda_n - \sum_{n=2}^N \Lambda_n \sum_{i=1}^{n-1} \beta_{i,0}, \quad v_{N,0} = v_{0,0} + \sum_{n=1}^{N-1} \beta_{n,0}.$$

Унда кириш ва чиқишнинг стационар кўрсаткичлари орасидаги муносабат икки тенгламадан ташкил этади

$$v_{N,0} - v_{0,0} = \sum_{n=1}^{N-1} \beta_n, \quad \zeta_{N,0} - \zeta_{0,0} + v_{0,0} \sum_{n=1}^N \Lambda_n = - \sum_{n=2}^N \Lambda_n \sum_{i=1}^{n-1} \beta_{i,0}$$

ва бу системадан I-VI масалалар учун етмайдиган маълумотлар топилади.

Биринчи параграфда олинган матрица кўринишидаги муносабатлардан учинчи параграфда МГҚнинг кўп бўғинли қисми учун фойдаланилди.

Вектор-устун $\overset{\circ}{W}_{n,m}$ нинг бўғинларда ўзгариб боришини кузатайлик:

$$\overset{\circ}{W}_{0,m} = (\zeta_{0,m}, \xi_{0,m}, v_{0,m}, \mu_{0,m})^T - \text{қисмга (биринчи бўғинга) киришда;}$$

$$\overset{\circ}{W}_{1,m} = (\zeta_{1,m}, \xi_{1,m}, v_{1,m}, \mu_{1,m})^T = A_{1,m} \overset{\circ}{W}_{0,m} - 1\text{-бўғиннинг чиқишида;}$$

$$\overset{\circ}{W}_{2,m} = (\zeta_{2,m}, \xi_{2,m}, v_{2,m}, \mu_{2,m})^T = A_{2,m} \left[\overset{\circ}{W}_{1,m} + (0, 0, \beta_{1,m}, \alpha_{1,m})^T \right] - 2\text{-бўғин}$$

чиқишида; ...

$$\overset{\circ}{W}_{N,m} = (\zeta_{N,m}, \xi_{N,m}, v_{N,m}, \mu_{N,m})^T = A_{N,m} \left[\overset{\circ}{W}_{N-1,m} + (0, 0, \beta_{N-1,m}, \alpha_{N-1,m})^T \right] - N\text{-}$$

бўғин (қисм) чиқишида.

Ушбу муносабатлардан фойдаланиб, муайян ω_m ($m = 1, 2, \dots$) учун кириш $\overset{\circ}{W}_{0,m}$ ва чиқиш $\overset{\circ}{W}_{n,m}$ маълумотлари орасидаги боғланиш қурилди:

$$\overset{\circ}{W}_{n,m} = A_{N,m} \left(A_{N-1,m} \dots \left(A_{3,m} \left(A_{2,m} \left(A_{1,m} \overset{\circ}{W}_{0,m} + \bar{\alpha}_{1,m} \right) + \bar{\alpha}_{2,m} \right) + \bar{\alpha}_{3,m} \right) + \dots + \bar{\alpha}_{N-1,m} \right).$$

Реккурент йўқотишлар усули билан оралик коэффицентлардан қутилинди ва тўрт чизикли тенгламадан иборат система тузилди:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1^{N,m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_2^{N,m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_3^{N,m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_4^{N,m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11}\varphi_1^{0,m} + e_{12}\varphi_2^{0,m} + e_{13}\varphi_3^{0,m} + e_{14}\varphi_4^{0,m} \\ e_{21}\varphi_1^{0,m} + e_{22}\varphi_2^{0,m} + e_{23}\varphi_3^{0,m} + e_{24}\varphi_4^{0,m} \\ e_{31}\varphi_1^{0,m} + e_{32}\varphi_2^{0,m} + e_{33}\varphi_3^{0,m} + e_{34}\varphi_4^{0,m} \\ e_{41}\varphi_1^{0,m} + e_{42}\varphi_2^{0,m} + e_{43}\varphi_3^{0,m} + e_{44}\varphi_4^{0,m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

$$\text{Бунда } (\varphi_1^{0,m}, \varphi_2^{0,m}, \varphi_3^{0,m}, \varphi_4^{0,m})^T = (\zeta_{0,m}, \xi_{0,m}, v_{0,m}, \mu_{0,m})^T,$$

$$(\varphi_1^{N,m}, \varphi_2^{N,m}, \varphi_3^{N,m}, \varphi_4^{N,m})^T = (\zeta_{N,m}, \xi_{N,m}, v_{N,m}, \mu_{N,m})^T,$$

$$f_{i_N} = \sum_{i_N=1}^4 a_{i_N i_{N-1}}^{N,m} \sum_{i_{N-1}=1}^4 a_{i_{N-1} i_{N-2}}^{N-1,m} \left(\dots \left(\sum_{i_2=1}^4 a_{i_2 i_1}^{3m} \left(\sum_{i_1=1}^4 a_{i_2 i_1}^{2m} b_{i_1}^{1m} + b_{i_2}^{2m} \right) + b_{i_3}^{3m} \right) \dots + b_{i_{N-1}}^{N-1,m} \right),$$

$$e_{i_N, j} = \sum_{i_{N-1}=1}^4 a_{i_N, i_{N-1}}^{Nm} \sum_{i_{N-2}=1}^4 a_{i_{N-1}, i_{N-2}}^{N-1, m} \dots \sum_{i_2=1}^4 a_{i_3, i_2}^{3m} \sum_{i_1=1}^4 a_{i_2, i_1}^{2m} a_{i_1 j}^{1m} .$$

Масаланинг қўйилишига қараб система (7) соддалаштирилган ёки каторнинг бош элементини танлаш усулида ечилади. Натижада газ босими ва масса сарфининг кириш ва чиқишдаги m -гармоникаларининг коэффициентлари аниқланади.

У масалани ечиш жараёнида $W_{n, m}$ кетма-кетлигини ошиб борувчи n учун аниқлаш, учинчи параграфда кўрсатилганидек, тармоқ тугунларида $\sin \omega_m t$ ва $\cos \omega_m t$ коэффициентларини топиш имконини беради. ω_m частота учун кириш маълумотлари $\zeta_{0, m}, \nu_{0, m}, \xi_{0, m}$ ва $\mu_{0, m}$ маълум бўлганидан кейин масаланинг бошқа вариантлари учун ҳам ушбу кетма-кетликни қўллаш мумкин. Ушбу хусусият ҳисобга олинган ҳолда кўп бўғинли газ қувури учун ҳисоблаш алгоритми қурилди. У қуйидаги босқичлардан иборат:

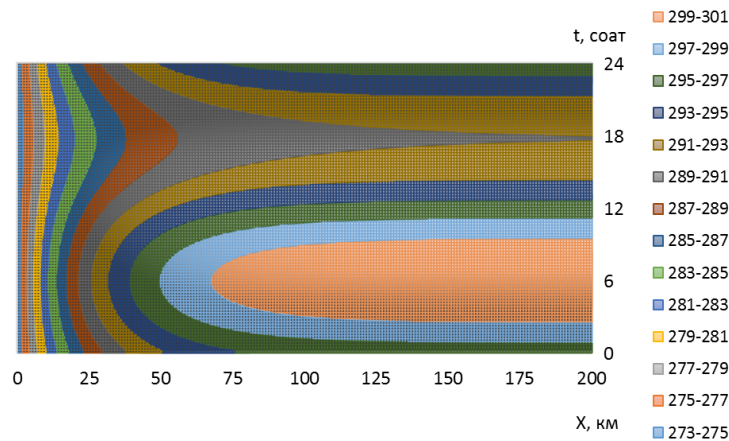
- 1) Қисмлар ва тармоқ учун зарурий маълумотларни шакллантириш.
- 2) Икки чегаравий шарт ва ички тугунлардаги газ олиш/қўшиш жадалликларини киритиш.
- 3) Етишмайдиган статик ташкил этувчиларни аниқлаш.
- 4) n -бўғин учун зарур маълумотларни аниқлаш имконини берувчи ва олиш/қўшиш жадалликларини ҳисобга олувчи матрицаларни ω_m ($m = 1, 2, \dots$) учун шакллантириш.
- 5) Реккурент ҳисоблашлар орқали ω_m учун фақат кириш ва чиқиш шартларини боғловчи охириги матрицани тузиш.
- 6) Масаланинг қўйилишига қараб, босим ва масса сарфи чегаравий функцияларда $\sin \omega_m t$ ва $\cos \omega_m t$ ларнинг етишмайдиган коэффициентларини аниқлаш.
- 7) Тўртинчи босқичда шакллантирилган матрицалар асосида оралик тугунлар учун босим ва масса сарфининг коэффициентларини аниқлаш.
- 8) Натижаларни сутканинг муайян вақти ёки тармоқнинг муайян масофаси учун визуаллаштириш интерфейси.

Ушбу алгоритм асосида яратилган дастур ва ҳисоблаш тажрибалари таҳлили диссертациянинг 4.3-параграфида батафсил баён этилган.

Диссертациянинг «**Магистрал газ қувури ва унинг бўғинларини ҳисоблаш дастурий таъминоти ва ҳисоблаш тажрибалари**» деб номланган тўртинчи боби уч параграфдан иборат.

4.1-параграфда МГҚ чизикли қисмидаги газнинг ҳароратининг йўл-йўлакай ўзгариши масаласига доир ҳисоблашлар учун Windows платформасида Borland Delphi 6 нинг Object Pascal тилида дастур ишлаб чиқилган дастур ва унинг асосида олинган натижалар муҳокама этилган.

Қувур орқали узатилаётган газ ҳароратининг вақт ва узунлик бўйлаб типик ўзгариши 2-расмда келтирилган. Ҳароратнинг кичик ошиши эрталабки соат 6 да, катта ошиши эса соат 16 да кузатилади. Бу кўрсаткичларга мос равишда босимнинг энг кичик ва энг катта тушишлари рўй беради.



2-расм. (x,t) ҳисоб текислигида газ изотермалари майдони.

$$T_0 = 296 \text{ K}, T_H = 273,5 \text{ K}, Q=250 \text{ м}^3/\text{с}, D = 1020 \text{ мм}, l = 200 \text{ км},$$

$$\Delta T = 5 \text{ K}, c_p = 2890,0 \text{ Ж}/(\text{кг K}), k_c = 1,75 \text{ Вт}/(\text{м с}).$$

Чегаравий шартларнинг даврийлигида МГҚ алоҳида бўғинида газ масса сарфи ва босимининг ўзгаришларини ҳисоблашга мўлжалланган дастурий восита 4.2-параграфда муҳокама этилган ва дастурнинг асосий ишчи ойнаси келтирилган.

Ушбу бобнинг 3-параграфида бир қувурли кўп бўғинли телескопик магистрал газ қувурида босим ва масса сарфининг даврий ўзгаришларини ҳисоблаш учун яратилган дастурлар ва улар ёрдамида ўтказилган ҳисоблаш тажрибалари натижалари баён қилинган ва таҳлил этилган.

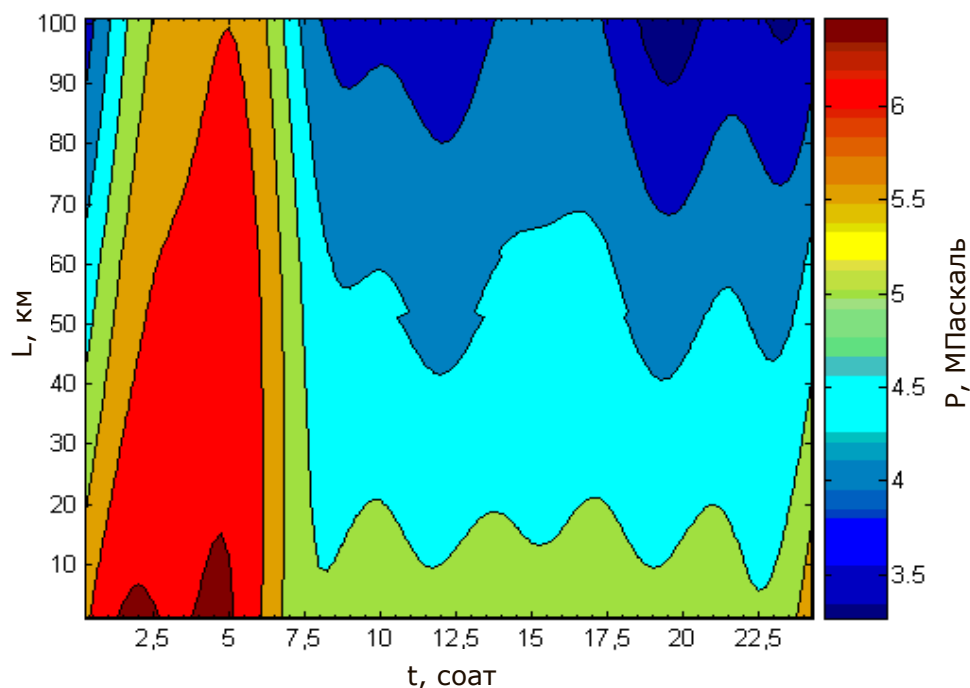
Тадқиқот натижалари амалий масалаларни ечишга жорий этилган, параметрлар танлови ва улар ўзгариш диапазонларига боғлиқ равишда реал объектларнинг фаолиятларини таҳлил этишга доир аниқ хулосалар берилган.

Кўп бўғинли қувур ҳисоби алгоритми асосида яратилган дастурий воситани қўллаб сонли тажрибалар орқали берилган чизиқли бўғинлар ва олиш/қўшиш жадаллиги коэффицентлари учун босим ва масса сарфининг кириш $\zeta_{0,m}, \xi_{0,m}, \nu_{0,m}, \mu_{0,m}$ ва чиқиш $\zeta_{N,m}, \xi_{N,m}, \nu_{N,m}, \mu_{N,m}$ коэффицентларининг бир қисм учун аниқланганидек эквивалентликка эга эканлиги исботланди. Яъни кириш ва чиқиш учун берилган ва аниқланувчи қаторлар ҳисоблаш аниқлиги доирасида олти хил масала учун ягона комплексни ташкил этади.

Даврий функцияларни Фурье қатори кўринишида тасвирлаш учун дастур модули ишлаб чиқилди ва диссертацияга илова шаклида қўшилди. У кўп бўғинли қисмнинг чегараларида босим ва/ёки масса сарфи ва ички тугунларда газ олиш/қўшиш жадаллигига мос дастлабки маълумотларни тайёрлаш имконини беради.

Ҳисоблашлар натижалари диалог режимида сутканинг муайян вақти ва/ёки тармоқнинг муайян масофаси учун жадвал ёки экран графикаси тарзида тақдим этилади. Таъкидлаш лозимки, натижаларни тақдим этиш қисм тугунларида масса сарфининг узилишлари билан боғлиқлик

хусусиятига эга. Ушбу омил натижаларни берилган вақт учун ҳам ва берилган масофа учун ҳам шакллантиришда ҳисобга олинган.



3-расм. Бир сутка ичида МГҚ узунлиги бўйлаб босимнинг (МПаскальда) ўзгариши

3-расмда босимнинг вақт бўйича, тўрт бўғинли ва уч кесимли газ олиниши бўлган МГҚ узунлигига боғлиқ равишда ўзгариши келтирилган. Ҳисоблашларда Фурье қаторининг дастлабки 13 ҳади қатнашган.

Олиб борилган сонли тажрибалар ишлаб чиқилган алгоритмнинг самарали эканлигини, нафақат алоҳида масала учун, балки газни қувур орқали узатиш яхлит технологик жараёнининг барча босқичларида машина ва хотирасини иқтисод қилишини кўрсатди. Бу натижалар газ транспорти тизимларини уларга хос омилларни ҳисобга олган ҳолда оптимал бошқарув масалаларига ўтиш имконини беради.

ХУЛОСА

«Даврий режимда ишлаётган ўзаро боғлиқ магистраль қувурларини математик моделлаштириш ва тадқиқ этиш» мавзусидаги диссертация бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Атроф муҳит ҳароратининг синусоидал ўзгариши учун В.Л.Шухов формуласи такомиллаштирилди ва ушбу формула қувурга киритилаётган газ ва атроф муҳит ҳароратларининг турлича қийматларида босим тушишини сифат жиҳатдан таҳлил этиш ҳамда газ ҳайдаш жараёнида газ ҳароратини оптимал қийматини аниқлаш имконини беради.

2. Магистрал газ қувури чизиқли бўғинининг газодинамик ҳолати масалалари учун изотермик режим, кириш ва чиқишда босимнинг суткалик

даврий ўзгариши ҳоли учун математик модель ишлаб чиқилди ва мос чегаравий шартлар учун комплекс сонлар майдонида ечилди. Бу чизиқли бўғин учун газ босим ва масса сарфи ўзгаришини аниқлаш ва оптимал режимни танлаш имконини беради.

3. Кириш ва чиқиш босими ва масса сарфи ($p(0,t)$, $M(0,t)$, $p(l,t)$ ва $M(l,t)$) дан иборат функциялар даврий қўзғалишлар учун ёпик тизимни ташкил этиши, яъни магистрал газ қувури чизиқли қисми учун улардан иккитаси берилгани ҳолида қолган иккитаси масала ечимини ташкил этиши исботланди. Ушбу факт МГҚ чизиқли қисмига доир масала қўйишнинг олти варианты учун ҳисоблашнинг экономик алгоритминини куриш имконини берди.

4. Магистрал газ қувурининг кўп бўғинли телескопик қисмининг турли даврий чегаравий ва ички шартлар ҳолида гидравлик кўрсаткичларини ҳисоблаш учун ягона алгоритм ва дастурий таъминот ишлаб чиқилди. Ишлаб чиқилган ягона алгоритм ва дастурий таъминот кўп бўғинли қисмининг етишмайдиган чегаравий функцияларини берилган тўплами учун тугун нуқталарида олиш/қўйишни ҳисобга олган ҳолда аниқлаш, газ босими ва масса сарфини муайян вақт momenti учун тугунларда ва ҳар километрда ёки берилган нуқтада сутка давомида ўзгаришини аниқлаш имконини беради.

5. Чегаравий ва ички шартларни Фурье қатори кўринишида тасвирлаш алгоритми ишлаб чиқилди. Ишлаб чиқилган алгоритм жадвал, бир ёки кўп поғонали қисмлардан ташкил топган функцияларни Фурье қатори кўринишида тасвирлаш имконини беради.

6. Ишлаб чиқилган дастурий таъминотлар ёрдамида ўтказилган ҳисоблаш тажрибалари «ЎзЛИТИнефтгаз» ОАЖнинг газ ва сувни қувур орқали узатиш тизимлари учун автоматлашган ишчи ўринлари ташкил этиш жараёнида, «Самарқандшаҳаргаз» газ узатиш тизимлари газодинамик кўрсаткичларини аниқлашда, Ўзбекистон нефть ва газ саноати илмий-муҳандислари жамияти объектларида магистрал газ қувурлари ихтиёрий кесимида суткалик ва сутканинг ихтиёрий momentiда босим ва масса сарфини аниқлаш ҳамда автоматик ишчи ўрин ташкил этишда қўлланилди ва меҳнат сарфини 9,5%га камайтириш имконини берди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.Т.07.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**НАУЧНО-ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННО-
КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

БОЛТИБАЕВ ШУХРАТЖОН КОМИЛЖАНОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ,
ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2017.1.PhD/T61.

Диссертация выполнена в Научно-инновационном центре информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.tuit.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Хужаев Исматулла Кушаевич
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Кабулов Анвар Васильевич
доктор технических наук, профессор

Маликов Зафар Маматкулович
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация:

**Научно-исследовательский институт
иригации и водных проблем**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2018 г. в __ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий. (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер №____). (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 года.
(протокол рассылки №__ от «__» _____ 2018 г.).

Р.Х.Хамдамов

Председатель научного совета по
присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор.

Ф.М.Нуралиев

Ученый секретарь научного совета по
присуждению учёных степеней, д.т.н., доцент.

Н.Равшанов

Председатель научного семинара при
научном совете по присуждению учёных
степеней, д.т.н., профессор.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы проблемы. В мире большое внимание уделяется автоматизации и моделированию процессов транспортировки нефти и газа на основе математического моделирования и современных информационных технологий. По данным компании British Petroleum, «мировое потребление природного газа за последний десять лет увеличилось на 2,5% (т. е. на 63 млрд. куб. м). Особенно увеличились объемы потребления газа в Центральной Азии (3,5%, 19 млрд. куб. м) и в Китае (7,7%, 16 млрд. куб. м)»¹. В связи с этим разработка и усовершенствование новых математических моделей, основанных на инновационных идеях для газотранспортных процессов, имеют особую роль.

В мире проводятся целенаправленные исследования по разработке математических моделей, алгоритмов расчета и программного обеспечения для определения параметров транспортировки газа, диаметра газопровода, рабочего давления, расположения компрессорных станций, выбора оптимальных маршрутов магистрали в процессе транспортировки природного газа по магистральному газопроводу. Разработка моделей и алгоритмов расчета газотранспортных систем с учетом воздействия температуры окружающей среды в процессе транспортировки газа и неравномерности потребления газа и усовершенствование существующих моделей являются важнейшими задачами.

В нашей республике принимаются меры по разработке математических моделей, алгоритмов расчета и программного обеспечения для расчета, анализа, прогнозирования, проектирования и управления газотранспортными сетями с использованием новых инновационных технологий. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены задачи, в частности «...сокращение энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий ... внедрение информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, системы управления...»². Решение этих задач, в частности, дальнейшее развитие разработки математических моделей, численно-аналитических методов и вычислительных алгоритмов транспортировки и переработки газа, одного из основных источников энергии, с привлечением новых информационно-коммуникационных технологий являются из важнейших задач.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Указами Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», №УП-5264 от 29 ноября 2017 года «Об образовании Министерства инновационного

¹ <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/natural-gas/natural-gas-consumption.html>.

² Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

развития», Постановлениями Президента Республики Узбекистан №ПП-4024 от 21 ноября 2018 года «О мерах по совершенствованию системы контроля за внедрением информационных технологий и коммуникаций, организации их защиты», № ПП-3107 от 30 июня 2017 года «О мерах по совершенствованию системы управления нефтегазовой отраслью», Постановлением Кабинета министров Республики Узбекистан № 297 от 20 апреля 2018 года «О внесении изменений и дополнений в некоторые решения Правительства Республики Узбекистан» и другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии приоритетным направлением развития науки и технологий республики IV. «Информатизация и развитие информационно-коммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. По направлениям разработки математических моделей, алгоритмов и программных средств расчета, анализа, проектирования, прогнозирования газотранспортных систем и их управления в последние годы ведут исследования А.Кангас, Е.Карлссон, А.А.Чемерис, С.А.Бобровский, М.А.Гусейнзаде, П.Ф.Водяник, В.В.Грачев, С.Г.Щербаков, Е.И.Яковлев, М.Г.Анучин, Ю.П.Коротаев, В.С.Кулик, А.З.Миркин, В.В. Усиньш, В.В.Алешин, С.Н.Прялов, Е.В.Сеннова, В.Г.Сидлер, И.А.Чарный, В.И.Панферов, Н.Н.Ермолаева, С.А.Коршунов, А.М.Чионов, Р.А.Штыков, В.А.Гасилов, Е.В.Врагова, В.Е.Селезнев и другие иностранные ученые. Они внесли свои доли при решении задач проектирования, анализа функционирования, экономической оценки электрических сетей, сетей тепло-, газо- и водоснабжения и оперативного управления ими в статическом режиме функционирования в холодных и теплых условиях, при разработках моделей и алгоритмов магистралей, проложенных через различных рельефных местностей и водоёмов.

В частности, узбекскими учеными Ф.Б.Абуталиева, Э.Б.Абуталиева, Р.Садуллаева, И.К.Хужаева, И.Х.Вагапова, Н.З.Зайниева и другими построена единая формула проведения гидравлического расчета функционирующего в статическом режиме магистрального газопровода, которая учитывает многозвенность лучистой сети, изменения количества и гидравлических показателей параллельных нитей, а так же концентрированные отборы и подкачки газа.

На сегодняшний день мало изучены математические модели, численно-аналитические методы и алгоритмы, учитывающие суточную (периодическую) равномерность подвода, закачки/отбора газа и влияния суточного изменения температуры окружающей среды на функционирование взаимосвязанных сетей магистральных газопроводов.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов: №ФА-Ф1-Ф010+Ф016 «Фундаментальные проблемы

моделирования и управления сложными системами и процессами» (2007-2011), №Ф4-ФА-Ф005 «Усовершенствование моделей, разработка и исследование алгоритмических методов решения классов многомерных нелинейных задач математической физики для областей сложной конфигурации» (2012-2016) Научно-инновационного центра информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада Ал-Хоразмий.

Цель исследования. Разработка математических моделей, численно-аналитических методов и программных средств для расчета гидравлических параметров магистрального газопровода при различных постановках граничных условий в периодическом режиме.

Задачи исследования:

разработка алгоритма представления граничных и внутренних условий магистрального газопровода (МГ) и линейного участка в виде ряда Фурье;

разработка математической модели процесса влияния периодического изменения температуры окружающей среды на газодинамические показатели линейного участка МГ;

разработка модель задач о газодинамическом состоянии линейного участка магистрального газопровода без начальных условий при различных заданиях периодичных граничных условий;

разработка алгоритма гидравлического расчета телескопичного многозвенного газопровода при суточных изменениях давления и массового расхода газа в конечных сечениях газопровода с учетом концентрированных отбора и подкачки газа с переменной интенсивностью;

разработка алгоритмов вычисления и программных средств расчета гидравлических параметров перегона магистрального газопровода и линейного его участка для проведения вычислительных экспериментов.

Объектом исследования являются газодинамические показатели газотранспортных систем, функционирующих при различных периодических условиях.

Предметом исследования являются математические модели, вычислительные алгоритмы и программные средства для анализа функционирования и оперативного управления газотранспортных систем.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использованы общие законы физики, методы математического моделирования сложных систем, методы математической физики, теории функций комплексного переменного, численные методы.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

усовершенствована математическая модель изменения температуры транспортируемого по трубопроводу газа при учете суточного синусоидального изменения температуры окружающей среды;

разработана математическая модель линейного участка магистрального газопровода для различных комбинаций граничных условий в зависимости от суточного периодического изменения объема потребления газа;

разработан единый алгоритм расчета для определения газодинамических параметров перегона телескопичного магистрального газопровода, функционирующего в изотермическом режиме, при различных комбинациях граничных и внутренних условий;

создан эффективный численный алгоритм представления в ряды Фурье таблично заданных, одно- и многоступенчатых функций.

Практические результаты исследования состоит из следующих:

разработаны алгоритмы построения ряда Фурье функций, заданных в виде таблиц и кусочно-непрерывных функций, которые использованы при Фурье-представлении давления, массового расхода на входе и выходе МГ и интенсивностей отборов/подкачек;

выявлено, что максимальное воздействие суточного синусоидального изменения температуры окружающей среды соответствует 16-и часам суток, когда на транспортировке газа затрачивается наибольшая энергия;

разработаны алгоритм и программное обеспечение расчета сети многозвенного телескопичного магистрального газопровода при различных заданиях граничных и внутренних условий в периодическом режиме.

Достоверность результатов исследования обосновывается тем, что использованные уравнения составлены на основе законов сохранения массы, импульса и энергии, использованные методы решения задач ранее апробированы при решении многочисленных задач; суждения об эквивалентности комплекса из четырёх функций, представляющих краевых изменений давления и расхода газа, имеют доказательства.

Научная и практическая значимость результатов исследований. Научная значимость результатов исследований объясняется разработкой и развитием методов математического и численного моделирования периодических процессов в магистральных газопроводах с учетом внутренних и внешних факторов.

Практическая значимость результатов исследования связана с созданием необходимого информационного обеспечения для определения оптимальной температуры газа, режима включения дополнительных оборудования компрессорной станции при проектировании и оптимального управления системами газотранспортной системы.

Внедрение результатов исследования. На основе разработанных моделей, алгоритмов и программных средств для расчета процесса транспортировки газа по линейным и многозвенным магистральным газопроводам:

ГУП «UNICON.UZ» выдало заключение о возможности использования программные средств, «Программа расчета суточных изменений расхода и давления газа в телескопических магистральных газопроводах при динамическом режиме с учетом различных внутренних и граничных условий», «Программа расчета изменений расхода и давления газа в элементарном участке магистрального газопровода с ресивером в периодическом режиме», «Программа расчета изменений расхода и давления газа на элементарном участке магистрального газопровода с учетом силы

инерции в периодическом режиме» созданные для вычисления параметров магистрального газопровода и его линейных участков. (ГУП «UNICON.UZ» от 9 октября 2018 года). В результате появилась возможность разработки оптимальных режимов газотранспортных систем на основе алгоритмов расчета параметров сети газопроводов и их линейных частей;

программное средство, разработанное для определения давления и массового расхода газа многозвенного газопроводов при задании гидравлических параметров звеньев, интенсивности отбора/подкачки газа в промежуточных узлах, внедрено в Узбекистанском научно-инженерном обществе нефтяной и газовой промышленности (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан № 33-8/2533 от 11 апреля 2018 года). Результаты научных исследований позволили определить рабочий режим газотранспортных систем, функционирующих в динамическом режиме, провести гидравлический расчет магистрального газопровода и достигнуть 9,5% сокращение трудозатрат при определении режимов включения и отключения оборудования компрессорной станции в процессе управления;

алгоритм расчета изменения температуры транспортируемого по трубопроводу газа при синусоидальном изменении температуры окружающей среды внедрены специалистами ОАО «УзЛИТИнефтегаз» в процессе расчета трубопроводных систем (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан № 33-8/2533 от 11 апреля 2018 года). В результате научного исследования удалось увеличить производительность труда в процессе организации автоматизированных рабочих мест для определения термодинамических показателей транспортируемого трубопроводом газа и для гидравлического расчета;

алгоритм и программное средство определения газодинамических параметров линейного участка магистрального газопровода при различных заданиях периодических граничных условий были использованы специалистами-инженерами «Самаркандгоргаз» для определения газодинамических параметров газотранспортных систем (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан № 33-8/2533 от 11 апреля 2018 года). Результаты научных исследований позволили эффективно управлять газопроводами, определить режимов включения и отключения устройств компрессорной станции, оперативно определить гидравлические параметры взаимосвязанных линейных участков.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования обсуждены на 11 международных и 10 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 36 научных работ, 7 журнальных статей (3 в зарубежных) в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, также получены 3 свидетельства о

регистрации программных продуктов для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем работы составляет 113 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики, сформулированы цели и задачи, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в практику, сведения об опубликованных работах и структура диссертации.

Первая глава диссертационной работы **«Анализ литературы по моделированию функционирования трубопроводов»**, которая состоит из четырех параграфов, посвящена обзору литературных источников, опубликованных в основном за последние пятнадцать лет, и постановке задач исследования.

В параграфе 1.1 проведен анализ литературы по математическому моделированию магистральных газопроводов с учетом различных факторов.

В параграфе 1.2 анализируются успехи по численному моделированию газотранспортных систем и по методам квазилинеаризации, линеаризации, осреднения параметров и другим подходам.

В параграфе 1.3 обсуждены источники литературы, посвященные изучению периодического характера газодинамических параметров трубопроводов. Исходя из литературных обзоров в областях моделирования, алгоритмизации и разработки программных средств применительно к газотранспортной сети выясняется актуальность проблем по развитию новых направлений фундаментальных и прикладных исследований:

провести анализ и уточнение общих методов описания функционирования взаимосвязанных магистральных газопроводов с учётом различных внешних и внутренних факторов;

разработка математической моделей и информационных систем в рассматриваемых системах с учётом многомерности, многофазности, многокомпонентности и нестационарности процессов;

разработка численно-аналитических методов и усовершенствование существующих вычислительных алгоритмов для решения математических моделей конкретных предметных областей;

проведение сравнительный анализ эффективности работы новых вычислительных моделей и алгоритмов и традиционных схем вычислений в указанных областях приложений, дать рекомендации по развитию новых направлений фундаментальных и прикладных исследований.

В параграфе 1.4 обосновываются постановки задач для элементарного участка с учетом периодического изменения температуры окружающей среды и при неравномерности отбора газа, а также задач для сети магистрального газопровода при неравномерности отборов и подкачек газа. При формировании этих задач использованы уравнения сохранения импульса, массы и энергии, а также уравнение состояния реального газа.

Вторая глава работы **«Аналитические решения задач газодинамических показателей линейного участка магистрального газопровода при учете суточного изменения температуры окружающей среды, входных и выходных показателей»** состоит из трех параграфов.

Известно, что высокая температура транспортируемого газа приводит к большим потерям давления, а низкая – к возможному образованию конденсатов и гидратов. В связи с этим в параграфе 2.1 рассмотрена задача о путевом изменении температуры газа, обусловленное суточным изменением температуры окружающей трубопровода среды.

Процесс изменения температуры газа $T(x, t)$ описали уравнением

$$\frac{\partial c_p T}{\partial t} + \frac{M}{F} \frac{\partial c_p T}{\partial x} + \frac{4k_c}{D} (T - T_{oc}) = 0.$$

Здесь D , $F = \pi D^2/4$ – диаметр и площадь поперечного сечения газопровода; k_c – коэффициент, который отражает теплообмен в системе; c_p – удельная теплоемкость газа при постоянстве давления; $M = \rho w F$ – массовый расход газа; ρ , w – плотность и скорость газа. Температура грунта T_{oc} меняется синусоидальным законом $T_{oc}(t) = T_0 + \Delta T \sin \omega t$; $\omega = 2\pi/84600 \text{ c}^{-1}$; T_0 – среднесуточная температура грунта; ΔT – амплитуда изменения температуры грунта. При $c_p = \text{const}$ получено аналитическое решение

$$T(x, t) = T_0 + (T_n - T_0)e^{-fx} + \frac{d}{\theta\sqrt{b}} \left[e^{-fx} \cos(\omega t - \theta x + \varphi) - \cos(\omega t + \varphi) \right].$$

$$\text{Здесь } f = \frac{k_c \pi D}{c_p M}, \quad \varphi = \arctg(f/\theta), \quad b = f^2 + \theta^2, \quad d = f\theta\Delta T, \quad \theta = F\omega/M.$$

Первые две слагаемые в этом решении представляют известную формулу В.Г.Шухова. В связи с этим полученное решение можно назвать усовершенствованной формулы В.Г.Шухова для случая периодического изменения температуры окружающей среды.

В параграфе 2.2 получены аналитические решения задач суточной периодической неравномерности потребления и компримирования газа на линейном участке МГ при шести различных постановках граничных условий относительно статического давления и массового расхода газа:

$$\begin{aligned} \text{вариант I:} & \quad p_H = \bar{N}(t), \quad p_K = \tilde{N}(t); \\ \text{вариант II:} & \quad M_H = \bar{N}(t), \quad M_K = \tilde{N}(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{вариант III:} & \quad p_H = \bar{N}(t), \quad M_K = \tilde{N}(t); \\
\text{вариант IV:} & \quad M_H = \bar{N}(t), \quad p_K = \tilde{N}(t); \\
\text{вариант V:} & \quad M_H = \bar{N}(t), \quad p_H = \tilde{N}(t); \\
\text{вариант VI:} & \quad M_K = \bar{N}(t), \quad p_K = \tilde{N}(t).
\end{aligned}$$

При учете только силы трения в уравнении сохранения импульса система уравнений для элементарного участка газопровода имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\lambda |w|}{2D} \rho w = 0, \quad \frac{\partial \rho w}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad p = Z \rho R T. \quad (1)$$

В качестве примера представим решения задачи варианта V, когда граничные условия в виде ряда Фурье заданы на входе участка:

$$p(0, t) = \zeta_0 + \sum_{m=1} (\xi_m \sin \omega_m t + \zeta_m \cos \omega_m t), \quad (2)$$

$$M(0, t) = \nu_0 + \sum_{m=1} (\mu_m \sin \omega_m t + \nu_m \cos \omega_m t). \quad (3)$$

Считаем, что коэффициент сопротивления трения λ , характерная скорость w_* ($|w| \approx w_*$ – параметр линеаризации), диаметр трубопровода D , скорость распространения малых возмущений c , коэффициент сверхсжимаемости Z , газовая постоянная R и абсолютная температура T газа заданы и имеют постоянные значения. Длина участка составляет l . Соответственно циклические частоты имеют значения $\omega_m = 2\pi m / T_{per}$, где T_{per} – период возмущений (для суточных изменений $T_{per} = 84600$ с).

Стационарную часть решения, определяемая из (1)–(3), при $\lambda_* = \lambda w_* / (2D)$, имеет вид $M_{CT} = \nu_0$, $p_{CT}(x) = \zeta_0 - \frac{\lambda_*}{F} \nu_0 x$.

Для получения периодической части решения задачи систему уравнений (1) представим в виде параболического уравнения относительно статического давления $\frac{\partial p}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ и массового расхода $\frac{\partial M}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$, где $a^2 = 2Dc^2 / (\lambda w_*)$ – постоянная величина.

Сначала задачу решаем для фиксированной частоты ω_m относительно массового расхода и давления, далее, суммируя их по m , находим нестационарные части решения.

Решение массового расхода, соответствующее $\cos \omega_m t$ с единичной амплитудой входного расхода, ищется в виде комплексной функции

$$\bar{M}_m(x, t) = e^{-i\omega_m t} \bar{K}_m(x).$$

Так как $e^{-i\omega_m t} = \cos \omega_m t - i \sin \omega_m t$, то действительная часть комплексного решения $\bar{M}_m(x, t)$ соответствует решению для $\cos \omega_m t$ с единичной амплитудой входного расхода, а мнимая часть – для $-\sin \omega_m t$.

Согласно граничным условиям решение будет

$$\bar{K}_m(x) = \cos(\theta_m + i\theta_m)x = \cos\theta_m x \operatorname{ch}\theta_m x - i \sin\theta_m x \operatorname{sh}\theta_m x = \bar{R}_{K,m}(x) + i\bar{I}_{K,m}(x).$$

Согласно этому для фиксированной частоты ω_m решение, соответствующее доли массового расхода, имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{M}_m(x,t) &= e^{-i\omega_m t} \bar{K}_m(x) = (\cos\omega_m t - i \sin\omega_m t) [\bar{R}_{K,m}(x) + i\bar{I}_{K,m}(x)] = \\ &= [\bar{R}_{K,m}(x) \cos\omega_m t + \bar{I}_{K,m}(x) \sin\omega_m t] + i [-\bar{R}_{K,m}(x) \sin\omega_m t + \bar{I}_{K,m}(x) \cos\omega_m t]. \end{aligned}$$

Чтобы найти долю входного давления в массовом расходе условие (2) преобразуем с помощью второго уравнения системы (1):

$$\frac{\partial \bar{M}_m(0,t)}{\partial x} = -\frac{F}{c^2} \frac{\partial \bar{p}_m(0,t)}{\partial t} = \frac{F\omega_m}{c^2} \zeta_m \sin\omega_m t - \frac{F\omega_m}{c^2} \xi_m \cos\omega_m t. \quad (4)$$

Решение ищем в виде $\tilde{M}_m(x,t) = e^{-i\omega_m t} \tilde{K}_m(x)$. Согласно условию (4):

$$\begin{aligned} \tilde{K}_m(x) &= \frac{\sin(\theta_m + i\theta_m)x}{\theta_m + i\theta_m} = \frac{1}{2\theta_m} (\sin\theta_m x \operatorname{ch}\theta_m x + \cos\theta_m x \operatorname{sh}\theta_m x) + \\ &+ \frac{i}{2\theta} (-\sin\theta_m x \operatorname{ch}\theta_m x + \cos\theta_m x \operatorname{sh}\theta_m x) = \tilde{R}_{K,m}(x) + i\tilde{I}_{K,m}(x). \end{aligned}$$

Определим значение доли изменения давления с единичной амплитудой в массовом расходе:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_m(x,t) &= e^{-i\omega_m t} \tilde{K}_m(x) = (\cos\omega_m t - i \sin\omega_m t) [\tilde{R}_{K,m}(x) + i\tilde{I}_{K,m}(x)] = \\ &= [\tilde{R}_{K,m}(x) \cos\omega_m t + \tilde{I}_{K,m}(x) \sin\omega_m t] + i [-\tilde{R}_{K,m}(x) \sin\omega_m t + \tilde{I}_{K,m}(x) \cos\omega_m t]. \end{aligned}$$

Суммируя доли и упростив, получаем следующее решение для массового расхода:

$$\begin{aligned} M_m(x,t) &= \left[v_m \bar{R}_{K,m}(x) - \mu_m \bar{I}_{K,m}(x) - \frac{F\omega_m}{c^2} \xi_m \tilde{R}_{K,m}(x) - \frac{F\omega_m}{c^2} \zeta_m \tilde{I}_{K,m}(x) \right] \cos\omega_m t + \\ &+ \left[v_m \bar{I}_{K,m}(x) + \mu_m \bar{R}_{K,m}(x) - \frac{F\omega_m}{c^2} \xi_m \tilde{I}_{K,m}(x) + \frac{F\omega_m}{c^2} \zeta_m \tilde{R}_{K,m}(x) \right] \sin\omega_m t. \quad (5) \end{aligned}$$

Аналогичное повторение процесса для давления газа для фиксированной частоты ω_m дает

$$\begin{aligned} p_m(x,t) &= \left[\zeta_m \bar{R}_{K,m}(x) - \xi_m \bar{I}_{K,m}(x) - \frac{\lambda_*}{F} v_m \tilde{R}_{K,m}(x) + \frac{\lambda_*}{F} \mu_m \tilde{I}_{K,m}(x) \right] \cos\omega_m t + \\ &+ \left[\zeta_m \bar{I}_{K,m}(x) + \xi_m \bar{R}_{K,m}(x) - \frac{\lambda_*}{F} v_m \tilde{I}_{K,m}(x) - \frac{\lambda_*}{F} \mu_m \tilde{R}_{K,m}(x) \right] \sin\omega_m t. \quad (6) \end{aligned}$$

Такие же результаты получены для остальных пяти вариантов постановки задачи.

В параграфе 2.3 доказана эквивалентность решений задач при различных постановках, т.е. при произвольном задании двух граничных функций давления и расхода газа на входе и выходе участка из решения соответствующей задачи следуют две остальные функции из этой системы.

Типичные изменения массового расхода в начале (задано) и в конце

(вычислено) участка приведены на рис. 1.

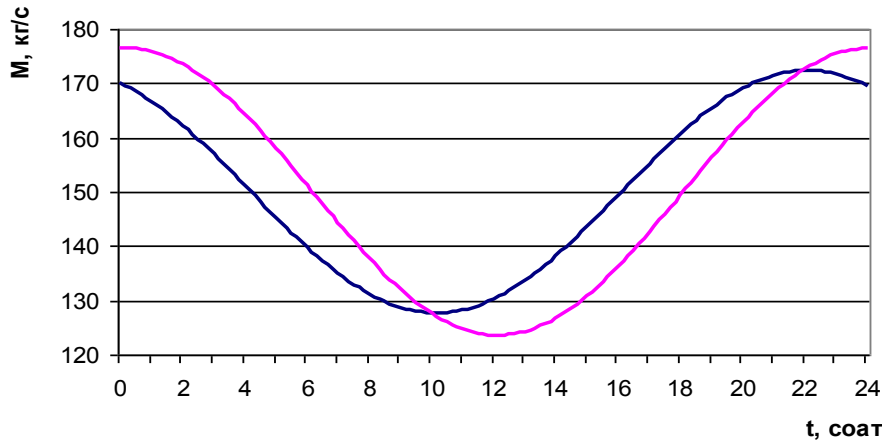


Рис. 1. Периодическое изменение массового расхода в начале и конце участка с длиной $L = 50$ км. $D = 0.992$ м, $\lambda = 0.01$, $w_* = 10$ м/с, $c = 200$ м/с.

Эквивалентность решений, соответствующие статической части, доказали аналитическим путем, что, в дальнейшем подтвердили численными результатами. Эквивалентность периодических частей решений доказали с помощью вычислительного эксперимента. Результаты расчетов во всех случаях показали, что отличия при сравнениях не превышают 10^{-5} в приведенных величинах.

Третья глава работы «**Разработка численно-аналитических методов и алгоритмов расчета сети магистрального газопровода при суточном изменении граничных и внутренних условий**» состоит из четырех параграфов.

В параграфе 3.1 моделирование динамического состояния n -го элементарного участка осуществляли с помощью уравнений Н.Е.Жуковского

$$\frac{\partial p_n}{\partial x} + \frac{2a_n}{F_n} M_n = 0, \quad \frac{\partial M_n}{\partial x} + \frac{F_n}{c^2} \frac{\partial p_n}{\partial t} = 0;$$

где давление p_n и массовый расход M_n газа являются переменными от времени t и расстояния x . Постоянное $2a_n$ характеризует закон перепада давления на участке; $F_n = \pi D_n^2 / 4$ — площадь поперечного сечения участка.

Ограничимся рассмотрением случая без начальных условий, когда на входе n -го участка заданы давление и расход газа в виде рядов Фурье и с использованием аналитического решения из главы II построим решения в конце n -го участка магистрального газопровода.

Стационарная часть решения имеет вид:

$$p_{CTn,0}(l_n, t) = \zeta_{n-1,0} - \frac{\lambda_n w_* l_n}{2D_n F_n} v_{n-1,0} = const, \quad M_{CTn,0}(l_n, t) = v_{n-1,0} = const,$$

а для фиксированной гармоник ω_m ($m = 1, 2, \dots$) получены решения, аналогичные (5) и (6).

В векторном виде коэффициенты решения для ω_m представляются как

$W_{n,m} = (\zeta_{n,m}, \xi_{n,m}, \nu_{n,m}, \mu_{n,m})^T$ (здесь и далее $(\cdot)^T$ – оператор транспонирования). Тогда взаимосвязь между входными и выходными показателями n -го участка составляет

$$W_{n,m} = A_{n,m} \overset{\circ}{W}_{n-1,m};$$

где $A_{n,m} = \begin{pmatrix} a_{1,1}^{n,m} & a_{2,1}^{n,m} & a_{1,3}^{n,m} & a_{1,4}^{n,m} \\ a_{1,2}^{n,m} & a_{2,2}^{n,m} & a_{2,3}^{n,m} & a_{2,4}^{n,m} \\ a_{1,3}^{n,m} & a_{3,2}^{n,m} & a_{3,3}^{n,m} & a_{3,4}^{n,m} \\ a_{1,4}^{n,m} & a_{4,2}^{n,m} & a_{4,3}^{n,m} & a_{4,4}^{n,m} \end{pmatrix} = \|a_{i,j}^{n,m}\|,$

$$a_{1,1}^{n,m} = \bar{R}_{Kn,m}(l_n), a_{1,2}^{n,m} = -\bar{I}_{Kn,m}(l_n), a_{1,3}^{n,m} = -\frac{\lambda_{*n}}{F_n} \tilde{R}_{Kn,m}(l_n), a_{1,4}^{n,m} = \frac{\lambda_{*n}}{F_n} \tilde{I}_{Kn,m}(l_n),$$

$$a_{2,1}^{n,m} = \bar{I}_{Kn,m}(l_n), a_{2,2}^{n,m} = \bar{R}_{Kn,m}(l_n), a_{2,3}^{n,m} = -\frac{\lambda_{*n}}{F_n} \tilde{I}_{Kn,m}(l_n), a_{2,4}^{n,m} = -\frac{\lambda_{*n}}{F_n} \tilde{R}_{Kn,m}(l_n),$$

$$a_{3,1}^{n,m} = -\frac{F_n \omega_m}{c^2} \tilde{I}_{Kn,m}(l_n), a_{3,2}^{n,m} = -\frac{F_n \omega_m}{c^2} \tilde{R}_{Kn,m}(l_n), a_{3,3}^{n,m} = \bar{R}_{Kn,m}(l_n), a_{3,4}^{n,m} = -\bar{I}_{Kn,m}(l_n),$$

$$a_{4,1}^{n,m} = \frac{F_n \omega_m}{c^2} \tilde{R}_{Kn,m}(l_n), a_{4,2}^{n,m} = -\frac{F_n \omega_m}{c^2} \tilde{I}_{Kn,m}(l_n), a_{4,3}^{n,m} = \bar{I}_{Kn,m}(l_n), a_{4,4}^{n,m} = \bar{R}_{Kn,m}(l_n),$$

$$\bar{R}_{Kn,m}(x) = \cos \theta_{n,m} x ch \theta_{n,m} x, \tilde{R}_{Kn,m}(x) = \frac{1}{2\theta_{n,m}} (\sin \theta_{n,m} x ch \theta_{n,m} x + \cos \theta_{n,m} x sh \theta_{n,m} x),$$

$$\bar{I}_{Kn,m}(x) = -\sin \theta_{n,m} x sh \theta_{n,m} x, \tilde{I}_{Kn,m}(x) = (-\sin \theta_{n,m} x ch \theta_{n,m} x + \cos \theta_{n,m} x sh \theta_{n,m} x),$$

$$\theta_{n,m} = \sqrt{\frac{\omega_m}{2a_n^2}}, a_n^2 = \frac{2D_n c^2}{\lambda_n w_{*n}}, w_{*n} - \text{характерная скорость газа в } n\text{-м участке.}$$

В матрице $A_{n,m}$ первые две строки относятся давлению, последние две строки – массовому расходу; нечетные строки относятся $\cos \omega_m t$, а четные – $\sin \omega_m t$.

С учетом отбора/подкачки в конце n -го участка в начале $n+1$ -го участка перегона вектор показателей имеет вид

$$\overset{\circ}{W}_{n,m} = W_{n,m} + \bar{\alpha}_{n,m},$$

где $\bar{\alpha}_{nm} = (0, 0, b_3^{n,m}, b_4^{n,m})^T$ отражает интенсивность отбора/подкачки с синус – и косинус – компонентами для массового расхода; $b_3^{n,m} = \beta_{n,m}$, $b_4^{n,m} = \alpha_{n,m}$.

На входе первого участка заданы $p_{CT1}(0) = \zeta_{0,0}$ и $M_{CT1}(0) = \overset{\circ}{\nu}_{0,0} (= \nu_{0,0})$, в его конце – $\zeta_{1,0} = \zeta_{0,0} - \frac{\lambda_{*1} l_1}{F_1} \nu_{0,0}$, $\nu_{1,0} = \overset{\circ}{\nu}_{0,0}$. С учетом интенсивности отбора/подкачки газа $\beta_{1,0}$ в начале второго участка имеем: $\zeta_{1,0} = \zeta_{0,0} - \frac{\lambda_{*1} l_1}{F_1} \nu_{0,0}$,

$\overset{\circ}{v}_{1,0} = v_{1,0} = v_{0,0} + \beta_{1,0}$. Тогда в конце второго участка получим

$$\zeta_{2,0} = \zeta_{1,0} - \frac{\lambda_{*2} l_2}{F_2} \overset{\circ}{v}_{1,0} = \zeta_{0,0} - \frac{\lambda_{*1} l_1}{F_1} v_{0,0} - \frac{\lambda_{*2} l_2}{F_2} (v_{0,0} + \beta_{1,0}) \quad v_{2,0} = \overset{\circ}{v}_{1,0}.$$

И т.д. В конце N -го участка, при $\Lambda_n = \frac{\lambda_n w_{*n} l_n}{2D_n F_n}$, получим формулы:

$$\zeta_{N,0} = \zeta_{0,0} - v_{0,0} \sum_{n=1}^N \Lambda_n - \sum_{n=2}^N \Lambda_n \sum_{i=1}^{n-1} \beta_{i,0}, \quad v_{N,0} = v_{0,0} + \sum_{n=1}^{N-1} \beta_{n,0}.$$

Тогда взаимосвязь между входными и выходными показателями стационарных частей решения представляется системой из двух уравнений

$$v_{N,0} - v_{0,0} = \sum_{n=1}^{N-1} \beta_n, \quad \zeta_{N,0} - \zeta_{0,0} + v_{0,0} \sum_{n=1}^N \Lambda_n = - \sum_{n=2}^N \Lambda_n \sum_{i=1}^{n-1} \beta_{i,0},$$

из которой можно находить недостающие показатели задач I-VI.

Полученные в этом параграфе матричные представления взаимосвязи между входными и выходными показателями зависимости в третьем параграфе применены для расчета перегона магистрального газопровода.

Проследим за изменением вектор-столбца $\overset{\circ}{W}_{n,m}$ в узлах перегона и получим следующую последовательность:

$$\overset{\circ}{W}_{0,m} = (\zeta_{0,m}, \xi_{0,m}, v_{0,m}, \mu_{0,m})^T - \text{на входе в перегон (или первого участка);}$$

$$W_{1,m} = (\zeta_{1,m}, \xi_{1,m}, v_{1,m}, \mu_{1,m})^T = A_{1,m} \overset{\circ}{W}_{0,m} - \text{на выходе 1-го участка;}$$

$$W_{2,m} = (\zeta_{2,m}, \xi_{2,m}, v_{2,m}, \mu_{2,m})^T = A_{2,m} \left[W_{1,m} + (0, 0, \beta_{1,m}, \alpha_{1,m})^T \right] - \text{на выходе}$$

2-го участка; ...

$$W_{N,m} = (\zeta_{N,m}, \xi_{N,m}, v_{N,m}, \mu_{N,m})^T = A_{N,m} \left[W_{N-1,m} + (0, 0, \beta_{N-1,m}, \alpha_{N-1,m})^T \right] - \text{на}$$

выходе N -го участка.

Используя данные отношения, можно построить взаимосвязь между входными $\overset{\circ}{W}_{0,m}$ и выходными $W_{n,m}$ данными перегона для фиксированного значения ω_m ($m = 1, 2, \dots$):

$$W_{n,m} = A_{N,m} \left(A_{N-1,m} \dots \left(A_{3,m} \left(A_{2,m} \left(A_{1,m} \overset{\circ}{W}_{0,m} + \bar{\alpha}_{1,m} \right) + \bar{\alpha}_{2,m} \right) + \bar{\alpha}_{3,m} \right) + \dots + \bar{\alpha}_{N-1,m} \right).$$

Способом рекуррентного исключения промежуточных коэффициентов составлена система линейных уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1^{N,m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_2^{N,m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_3^{N,m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_4^{N,m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11}\varphi_1^{0,m} + e_{12}\varphi_2^{0,m} + e_{13}\varphi_3^{0,m} + e_{14}\varphi_4^{0,m} \\ e_{21}\varphi_1^{0,m} + e_{22}\varphi_2^{0,m} + e_{23}\varphi_3^{0,m} + e_{24}\varphi_4^{0,m} \\ e_{31}\varphi_1^{0,m} + e_{32}\varphi_2^{0,m} + e_{33}\varphi_3^{0,m} + e_{34}\varphi_4^{0,m} \\ e_{41}\varphi_1^{0,m} + e_{42}\varphi_2^{0,m} + e_{43}\varphi_3^{0,m} + e_{44}\varphi_4^{0,m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Здесь

$$\begin{aligned} (\varphi_1^{0,m}, \varphi_2^{0,m}, \varphi_3^{0,m}, \varphi_4^{0,m})^T &= (\zeta_{0,m}, \xi_{0,m}, \nu_{0,m}, \mu_{0,m})^T, \\ (\varphi_1^{N,m}, \varphi_2^{N,m}, \varphi_3^{N,m}, \varphi_4^{N,m})^T &= (\zeta_{N,m}, \xi_{N,m}, \nu_{N,m}, \mu_{N,m})^T, \\ f_{i_N} &= \sum_{i_{N-1}=1}^4 a_{i_N i_{N-1}}^{N,m} \sum_{i_{N-2}=1}^4 a_{i_{N-1} i_{N-2}}^{N-1,m} \left(\dots \left(\sum_{i_2=1}^4 a_{i_3 i_2}^{3m} \left(\sum_{i_1=1}^4 a_{i_2 i_1}^{2m} b_{i_1}^{1m} + b_{i_2}^{2m} \right) + b_{i_3}^{3m} \right) \dots + b_{i_{N-1}}^{N-1,m} \right), \\ e_{i_N, j} &= \sum_{i_{N-1}=1}^4 a_{i_N i_{N-1}}^{Nm} \sum_{i_{N-2}=1}^4 a_{i_{N-1} i_{N-2}}^{N-1,m} \dots \sum_{i_2=1}^4 a_{i_3 i_2}^{3m} \sum_{i_1=1}^4 a_{i_2 i_1}^{2m} a_{i_1 j}^{1m}. \end{aligned}$$

Система (7) решается, в зависимости от постановки задачи, упрощенным способом или методом исключения главного элемента строки. В результате определяются недостающие коэффициенты давления и массового расхода газа в начале и конце перегона, соответствующие m -й гармонике.

При решения задачи V последовательное определения $W_{n,m}$ при возрастающем n , как это показали в параграфе 3.3, позволяет найти коэффициентов $\sin \omega_m t$ и $\cos \omega_m t$ в узлах перегона. Реализация результатов позволяет использовать данную последовательность и для других вариантов постановки задач, так как уже известны входные данные $\zeta_{0,m}, \nu_{0,m}, \xi_{0,m}$ и $\mu_{0,m}$ относительно частоты ω_m . С учетом этих особенностей построен алгоритм расчета многозвенного газопровода. Она состоит из следующих этапов:

- 1) Формирование данных для участков и сети.
- 2) Задание двух граничных условий и интенсивностей отбора/подкачки во внутренних узлах перегона.
- 3) Определение статических составляющих искомым
- 4) Формирование матриц для ω_m ($m=1,2,\dots$), которые с помощью входных данных позволяют определить необходимые данные n -го участка и концентрированные отборы или подкачки газа.
- 5) Рекуррентными вычислениями составляется конечное матричное уравнение для ω_m , которое увязывает только входные и выходные условия.
- 6) Согласно постановке задачи из конечного матричного уравнения определяются коэффициенты $\sin \omega_m t$ и $\cos \omega_m t$ недостающих граничных функций для давления и массового расхода газа.
- 7) Определение коэффициентов давления и массового расхода во внутренних узлах согласно матрицам, сформированным в четвертом этапе.

8) Интерфейс для визуализации результатов при фиксированном времени сутки или фиксированном расстоянии от начала перегона.

Программа, разработанная на основе данного алгоритма, и результаты расчета освещены в параграфе 4.3 диссертации.

Четвертая глава «**Программное обеспечение и вычислительные эксперименты расчета гидравлических параметров магистрального газопровода и его участков**» состоит из трех параграфов.

В параграфе 4.1 обсуждены программа, разработанная в среде Borland Delphi 6 на языке Object Pascal платформы Windows для ведения расчета по задачам путевого изменения температуры газа на элементарном участке МГ, и полученные на ее основе результаты.

Типичные изменения температуры транспортируемого газа по времени и длины участка представлены на рис. 2. Менее интенсивный рост температуры наблюдается примерно к 6 часам утра, а наибольший рост – к 16 часам. В соответствии этим данным ожидаются наименьший и наибольший перепады давления.

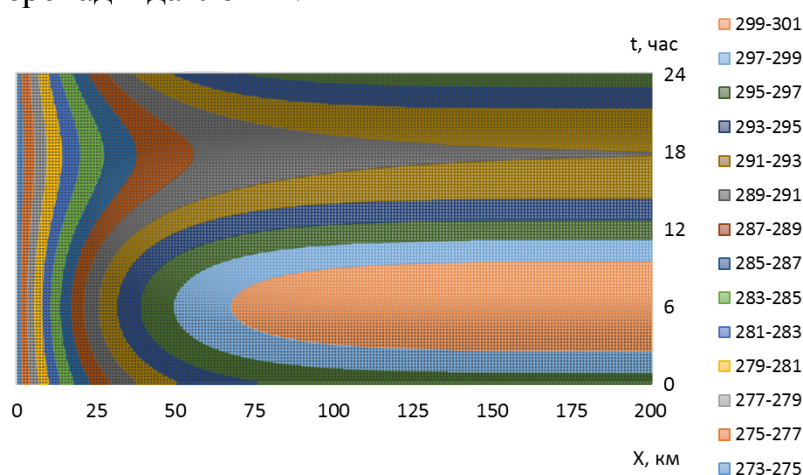


Рис. 2. Поле изотерм газа в расчетной плоскости (x, t) .

$$T_0 = 296 \text{ K}, T_H = 273,5 \text{ K}, M=250 \text{ кг/с}, D=1020 \text{ мм}, l=200 \text{ км},$$

$$\Delta T = 10 \text{ K}, c_p = 2890,0 \text{ Дж/(кг K)}, k_c = 1,75 \text{ Вт/(м c)}.$$

В параграфе 4.2 обсуждена программа, предназначенная для ведения расчета периодических изменений давления и массового расхода газа в однониточном телескопичном магистральном газопроводе, и приведено основное рабочее окно программы.

В параграфе 3 данной главы представлена программа расчета периодических изменений давления и массового расхода в многозвенном телескопичном магистральном газопроводе, приведены и обсуждены результаты проведенного по ней вычислительного эксперимента.

Результаты исследования применены при решении прикладных задач, представлены и анализированы результаты численного эксперимента по выбору параметров и диапазонов их изменения для реальных объектов.

Вычислительным экспериментом удалось доказать, что при заданных параметрах линейных участков и интенсивностей отбора и подкачки

коэффициенты входных $\zeta_{0,m}, \xi_{0,m}, \nu_{0,m}, \mu_{0,m}$ и выходных $\zeta_{N,m}, \xi_{N,m}, \nu_{N,m}, \mu_{N,m}$ давления и массового расхода перегона обладают тем же свойством, что и коэффициенты для одного участка. Т.е. заданные и найденные ряды для входа и выхода перегона составляют единый комплекс для шести разных вариантов постановки задачи.

Для представления периодических функций в виде рядов Фурье разработан модуль программы, который приведен в приложении диссертации. Он позволяет подготовить исходные данные, соответствующие давлению и/или расходу газа в конечных сечениях перегона и интенсивностям отбора/подкачки газа во внутренних узлах.

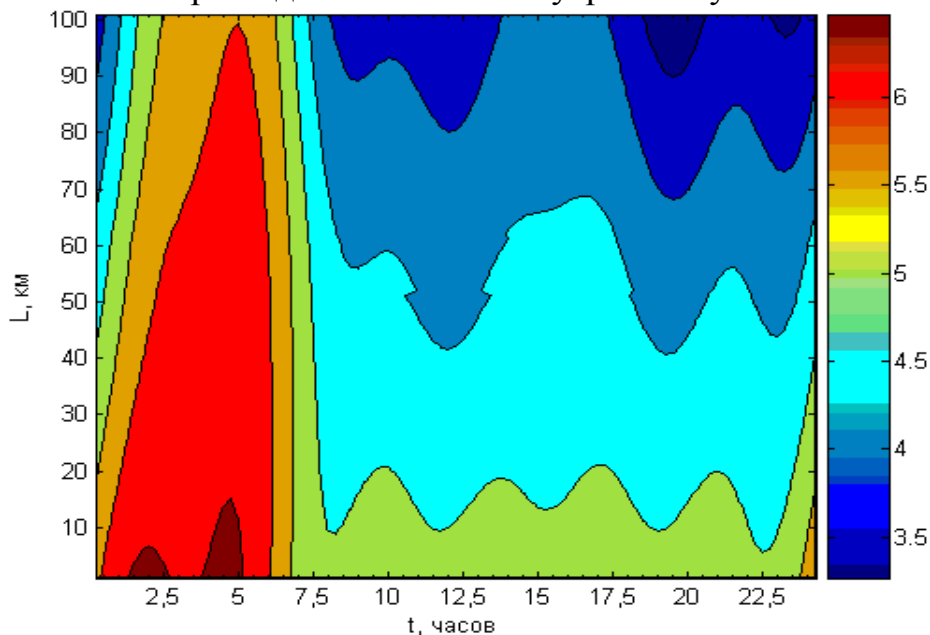


Рис. 3. Значения давления в сутки по длине МГ (в МПа)

Результаты вычислений представляются в виде таблиц или экранной графики при фиксированных временах суток и/или при фиксированном расстоянии от входа перегона, организуемые в диалоговом режиме. Следует отметить, что представление результатов имеет свои особенности, обусловленные разрывами массового расхода в узлах перегона. Данный факт учитывается как при представлении результатов при фиксированном времени, так и при фиксированных расстояниях, в т.ч. в узлах перегона.

На рис. 3 представлено изменение давления по времени и длине перегона магистрального газопровода, который имеет четыре участка с тремя сечениями с отбором газа. В расчетах учтены первые 13 члены рядов Фурье.

Проведенные вычислительные эксперименты показывают эффективность разработанного алгоритма для решения не только отдельных задач, но и всего технологического процесса транспортировки газа и тем самым экономить машинное время и объем оперативной памяти. Эти результаты позволяют переходить к решению задач оптимального управления газотранспортными системами с учетом различных факторов, присущих рассматриваемым объектам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований по диссертации «Математическое моделирование и исследование взаимосвязанных магистральных газопроводов, функционирующих в периодическом режиме» получены следующие результаты.

1. Усовершенствована формула В.Л. Шухова для синусоидального изменения температуры окружающей среды, и её можно использовать при качественном анализе падения давления при различных значениях температур входящего газа и окружающей среды, а также при определении оптимальной температуры газа в процессе транспортировки газа.

2. Разработана математическая модель газодинамического состояния элементарного участка магистрального газопровода при суточных изменениях входных и выходных давления и расхода газа в изотермическом режиме и решены в плоскости комплексных чисел при соответствующих граничных условиях. Это позволяет определить распределения давления и массового расхода газа и выбрать оптимальный режим работы элементарного участка.

3. Доказано, что набор входных и выходных давления и расхода газа при периодических возмущениях представляют замкнутую систему функций: при задании двух из них из решения уравнений состояния линейного участка МГ следуют две остальные. Данный факт позволил построить эффективный алгоритм расчета линейного участка МГ при шести вариантах постановки задачи с малым объемом вычислений.

4. Разработаны единый алгоритм и программное обеспечение для расчета многозвенного телескопического участка магистрального газопровода в различных заданиях граничных и внутренних условиях. Разработанный единый алгоритм и программное обеспечение позволяют определить отсутствующих функций гидравлических параметров при учете отбор/подкачки в узлах, определить изменения давления и массового расхода газа в узлах и в каждом километре при фиксированном времени или в сутках при фиксированной точке.

5. Разработан алгоритм представления граничных и внутренних условий в виде ряда Фурье. Разработанный алгоритм позволяет представить табличные, ступенчатой и многоступенчатой функций в виде ряда Фурье.

6. Вычислительные эксперименты, проведенные с помощью разработанных программных обеспечений, внедрены в процессе создания автоматизированных рабочих мест (АРМ) для системы транспортировки газа и воды ОАО «УзЛИТИнефтегаз», при определении газодинамических параметров газотранспортной системы «Самаркндгоргаз», при определении давления и массового расхода газа в произвольном времени сутки и в фиксированном сечении магистрального газопровода, а также разработке АРМ в Узбекском научно-инженерном обществе нефтяной и газовой промышленности и позволили сокращать затраты труда на 9,5%.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.27.06.2017.T.07.01 AT TASHKENT UNIVERSITY OF
INFORMATION TECHNOLOGIES**

**SCIENTIFIC AND INNOVATION CENTER OF INFORMATION AND
COMMUNICATION TECHNOLOGIES AT THE TASHKENT
UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES**

BOLTIBAEV SHUKHRATJON KOMILJANOVICH

**MATHEMATICAL MODELING AND RESEARCH OF THE
INTERRELATED MAIN GAS PIPELINES FUNCTIONING IN A
PERIODIC MODE**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent – 2018

The theme of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.1.PhD/T61.

The dissertation has been prepared at Scientific and Innovation Center of Information and Communication Technologies at the Tashkent University of Information Technologies.

The abstract of the dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website www.tuit.uz and an the website of «ZiyoNet» Information and educational portal www.ziynet.uz.

Scientific adviser :

Khujaev Ismatulla Kushaevich
doctor of technical sciences,
senior researcher

Official opponents:

Kabulov Anvar Vasilovich
doctor of technical sciences, professor

Malikov Zafar Mamatqulovich
doctor of technical sciences,
senior researcher

Leading organization:

Scientific-research institute of irrigation and water problems

The defense will take place “_____” _____ 2018 at _____ the meeting of Scientific council No. DSc.27.06.2017.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resourse Centre of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under No.____). (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52).

Abstract of dissertation sent out on “_____” _____ 2018 y.
(mailing report No. ___ on “_____” _____ 2018 y.).

R. Kh. Khamdamov

Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

F.M. Nuraliev

Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, dotsent

N. Ravshanov

Chairman of the academic seminar under
the scientific council awarding scientific
degrees, doctor of technical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work is to develop mathematical models, numerical-analytical methods and software tools for calculating the hydraulic parameters of the main gas pipeline with various settings of boundary conditions in a periodic mode.

The objects of the research work are gasodynamic parameters of gas transmission systems operating under various periodic conditions.

The scientific novelty of the research work is as follows:

the mathematical model of change in the temperature of the gas transported through the pipeline, taking into account the daily sinusoidal change in ambient temperature, was improved;

the mathematical model of the linear section of the main gas pipeline for various combinations of boundary conditions, depending on the daily periodic change in the gas consumption volume, was developed;

the calculation algorithm for determining the gas-dynamic parameters of the flow of a telescopic gas pipeline operating in the isothermal mode, with various combinations of boundary and internal conditions, was developed;

an efficient numerical algorithm for representing tabulated, single- and multi-step functions in Fourier series was created.

Implementation of the research results. On the basis of the developed model, algorithm and software for calculating the process of gas transportation through linear and multi-link main gas pipelines:

The State Unitary Enterprise “UNICON.UZ” issued a conclusion on the possibility to use software tools, ‘The program for calculating daily changes in gas flow and pressure in telescopic gas pipelines under dynamic conditions, taking into account various internal and boundary conditions’, ‘The program for calculating changes in gas flow and pressure in the elementary section of the main gas pipeline with the receiver in periodic mode’, ‘The program for calculating changes in gas flow and pressure in the elementary section of the main gas pipeline, taking into account the inertial force in periodic mode’ were created to calculate the parameters of the main gas pipeline and its linear sections. (conclusion of the State Unitary Enterprise “UNICON. UZ” dated October 9, 2018). As a result, the software for developing an optimal mode of gas transmission systems was developed using the algorithm for calculating the parameters of the gas pipeline and its linear sections;

the software tool for the determining of the gas pressure and mass flow rate for multi-link gas pipelines when setting the link hydraulic parameters, intensity of gas extraction/pumping in interim units was introduced into the activities of the oil and gas industry of Uzbekistan (Certificate No.33-8/2533 of the Ministry of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan dated April 11, 2018). The results of the research work made it possible to determine the operating mode of gas transmission systems operating in a dynamic mode, perform the hydraulic calculation of the main gas pipeline and reach 9.5%

reduction in labor costs when determining the mode of switching on and off the equipment of a compressor station in the control process.

the algorithm for calculating the change in the temperature of the gas that is being transported through pipelines with a sinusoidal change in ambient temperature were introduced by specialists of UzLITIneftegaz for calculation of pipeline systems (Certificate No.33-8/2533 of the Ministry of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan dated April 11, 2018). The results of the research work made it possible to increase the labor productivity in the process of organizing automated workplaces for determining the thermodynamic parameters of the gas transported by the pipeline and hydraulic calculation;

the algorithm and software tool for determining the gas-dynamic parameters of the linear section of the main gas pipeline with various settings of periodic boundary conditions were applied by engineers of Samarkandorgaz to determine the gas-dynamic parameters of gas transmission systems (Certificate No.33-8/2533 of the Ministry of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan dated April 11, 2018). The results of the research work made it possible to control the gas pipelines effectively, determine the modes switching on and off the equipment of a compressor station, promptly determine the hydraulic parameters of interconnected linear sections.

The outline of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, references and appendices. The dissertation volume is 113 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

1. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К., Абдуллаев Ф.А. Двойственные свойства уравнений трубопроводного транспорта сверхсжимаемых сред // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2010. - Вып. 1. – С. 53-56. (05.00.00; № 9).

2. Садуллаев Р., Хужаев И. К., Болтибаев Ш. К. Разработка обобщенного алгоритма расчета многозвенного магистрального газопровода в условиях суточной неравномерности расхода газа // Узбекский журнал: Проблемы информатики и энергетики, Ташкент, 2010. – №6. – С. 16-21 (05.00.00; № 5).

3. Маматов Н.С., Болтибаев Ш.К., Ахмедов Д.Д., Ниёзматова Н.А. Технология параллельного программирования: краткий обзор MPJ EXPRESS // Узбекский журнал: Проблемы информатики и энергетики, Ташкент, 2013. – №3-4. – С. 92-97 (05.00.00; № 5).

4. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. Исследование периодического изменения состояния реального газа и малосжимаемой жидкости в элементарном участке трубопровода // Узбекский журнал: Проблемы информатики и энергетики, Ташкент, 2013. – №5-6. – С. 24-30 (05.00.00; № 5).

5. Hujayev I.K., Boltibayev Sh.K. The algorithm for calculation of multilink gas pipeline which is functioning in periodic mode // European Applied Sciences. – Stuttgart (Germany), 2013, 9 (1). – PP. 110-115 (05.00.00; № 2).

6. Hujayev I. K., Boltibayev Sh. K., Bozorov O. Sh. Distribution of periodic perturbations of mass flow of gas at the elementary linear section of pipeline // European science review. – Vienna (Austria), 2015, №11-12. – pp. 210-213 (05.00.00; № 3).

7. Hujayev I.K., Boltibayev Sh.K. The Distribution of Periodic Perturbations of the Mass Flow of Gas on an Inclined Site of Gas Pipeline in Isothermal Mode // American Journal of Mathematical and Computational Sciences. – Wilmington (USA):AASCIT Vol. 1, No. 1, 2016, pp. 1-9 (05.00.00; № 1).

8. Mamadaliyev Kh., Khujayev I., Boltibaev Sh. Modeling of the propagation of mass consumption waves in the pipeline with damper of pressure disturbances. J. Ponte. – Florence (Italy), Volume 74, Issue 8, Aug 2018, pp. 163-170.

9. Khujaev I.Q., Boltibaev Sh. K. Analytical solution of the task for the daily change of gasodynamic parameters of the main gas pipeline // ISJ Theoretical & Applied Science, Volume 53, Issue 9, 2017, pp. 150-154.

10. Khujaev I.Q., Mamadaliev H.A., Boltibaev Sh.K. Distribution of wave spread wave perturbances in horizontal gas pipeline under the influence of fraction and inertia facilities. ISJ Theoretical & Applied Science, Volume 53, Issue 9, 2017, pp. 155-163.

11. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. Влияние суточного изменения температуры окружающей среды на показатели магистрального газопровода // Совместный выпуск Узбекского журнала «Проблемы информатики и энергетики», сборника научных трудов «Вопросы вычислительной и прикладной математики» по материалам Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и пути развития информационных технологий», г. Ташкент, 23-25 сентября 2008 г. – С. 112-117.

12. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. Магистрал газ кувурининг чизиқли кисмида босим ва сарфнинг сутка давомида ўзгаришига доир масалалар ҳақида // Совместный выпуск Узбекского журнала «Проблемы информатики и энергетики», сборника научных трудов «Вопросы вычислительной и прикладной математики» по материалам Республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и пути развития информационных технологий», г.Ташкент, 23-26 сентября 2009 г. – С. 151-155.

13. Болтибаев Ш.К. Алгоритм расчета многозвенного магистрального газопровода в условиях суточной неравномерности расхода газа // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. Сборник научных трудов. – Муром, 2010. – Выпуск 15. – С. 27-31.

14. Хужаев И.К., Бекбенов Н.Р., Болтибаев Ш.К. Периодическое решение задачи о динамическом режиме функционирования наклонного газопровода при частичном учете силы инерции // Узбекский журнал: Нефти и газа, Ташкент, 2007. – №4. – С. 43-46.

15. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. Периодические изменения газодинамических показателей линейного участка горизонтального газопровода при различных граничных условиях // Вопросы вычислительной и прикладной математики. Аналитические методы и вычислительные алгоритмы решения задач математической физики. – Ташкент, 2009. - Вып. 121. – С. 110-125.

16. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К., Бозоров О.Ш. Изучение распространения периодических возмущений массового расхода газа по наклонному участку газопровода с учетом сил трения, гравитации и инерции // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – Ташкент, 2015. – № 1. – С. 78-86.

17. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. Обобщение формулы В.Г.Шухова для суточного изменения температуры окружающей среды // Материалы Всероссийского семинара, посвященного столетию Кузьмина Павла Алексеевича «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением», г. Казань, 11-12 ноября 2008 г. – С. 99-100.

18. Болтибаев Ш.К., Ходжаев Ш.Т. О периодических возмущениях газодинамических параметров линейного участка магистрального газопровода с учетом всех силовых факторов // Информатика: проблемы, методология, технологии: Материалы XVII Международной научно-методической конференции. Воронеж, 2017. – С. 95-99.

19. Sadullaev R., Khuzhaev I.K., Boltibaev Sh.K. Research of daily change of temperature of transported gas on main to pipeline // Transactions of the conference Modern Problems of applied mathematics and information technologies – Alkhorezmiy 2009. Vol. 1. – Tashkent, 18-21 september 2009. – PP. 162-165.

20. Садуллаев Р., Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К., Абдуллаев Ф.А. Изменение эффективности участков газопроводов при учёте силы инерции газа // Современные проблемы механики: Материалы Международной научно-технической конференции. 23-24 сентября 2009. Ташкент, 2009. – С. 141-146.

21. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К., Тошов Б.Р. Алгоритм расчета суточного изменения газодинамических показателей сети однониточных трубопроводов // Современная техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития: Международная научно-техническая конференция, посвященная 15-летию Навоийского государственного горного института. 12-14 мая 2010. Навои, 2010. – С. 467

22. Алиев Ф.А., Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. Решение одной периодической задачи о газодинамическом состоянии линейного участка магистрального газопровода // Современные материалы, техника и технологии в машиностроении: Международная научно-практическая конференция 19-20 апреля 2012 г, Андижан, 2012. С. 341-346.

23. Khujaev I.K., Boltibaev Sh.K. The decision of the problem on the elementary section of the pipeline with the receiver functioning in the periodic mode // Perspectives for the development of information technologies ITPA-2014: transactions of the international scientific conference. - Tashkent, 2014. - PP. 158-163.

24. Болтибаев Ш.К. Периодические газодинамические параметры наклонного участка газопровода в изотермическом режиме // Прочность конструкций, сейсмодинамика и сооружений: Материалы международной научно-технической конференции. 12-14 сентября 2016. Ташкент, 2016. – С. 255-258.

25. Болтибаев Ш.К. Моделирование периодического состояния реального газа в элементарном участке трубопровода // Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2016: Труды V международной конференции. 9-10 ноября 2016 г, Бухара, 2016, – С. 37-40.

26. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. Задача о расчете гидравлических параметров газопровода в периодическом режиме функционирования // Инновация – 2016: Сборник научных статей международной конференции. Ташкент, 2016. – С. 232-233.

27. Болтибаев Ш.К. Обобщение формулы В.Л. Шухова для магистрального газопровода с учетом суточного изменения температуры окружающей среды // Proceedings of the International Scientific-Practical and Spiritual-Educational Conference Dedicated to the 1235th Anniversary of Muhammad al-Khwarizmi: International conference on Importance of

Information-Communication Technologies in Innovative Development of Sectors of Economy. April 5 – 6, Tashkent, 2018. pp. 368-370.

28. Болтибаев Ш.К. Магистрал газ қувири параметрларини суткалик даврий ўзгариши ҳақида // Ёш математикларнинг янги теоремалари – 2009: Республика илмий анжуманинг материаллари. 6–7 ноябрь 2009. Наманган, 2009. 140-141 б

29. Садуллаев Р., Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. Об эквивалентности решений задач периодических изменений давления и массового расхода газа в магистральном газопроводе // Информационно-коммуникационные технологии в высшем образовании: Республиканская научно-методическая конференция. 6–7 января 2010 г. - Ташкент, 2010. – С. 95 – 96.

30. Алиев Ф.А., Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К., Махкамов М.К. Единый алгоритм расчета перегона магистрального газопровода при суточной неравномерности потребления и компримирования газа // “Мамалакатимизни модернизация қилиш ва кучли фуқаролик жамияти барпо этишда илм, фан-технологиянинг ўрни” Республика илмий-техник анжуманинг материаллари, 29-30 апрель 2011 йил, Андижон шаҳри, АндМИИ. 36-37 б.

31. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. Моделирование процесса транспортировки газа в условиях неравномерности потребления // Современное состояние и перспективы развития информационных технологий: Доклады Республиканской научно-технической конференции 5-6 сентября 2011 г. Том II. Ташкент, 2011.- С. 251-254.

32. Болтибаев Ш.К. Способы определения отбора/подкачки в заданном узле магистрального газопровода // Перспективы эффективного развития информационных технологий и телекоммуникационных систем: сборник докладов республиканской научно-технической конференции. 13-14 марта 2014 г., Ч. 1. - Ташкент, 2014. - С. 319-321.

33. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К. О решении задачи распространения периодических возмущений давления и массового расхода газа // Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграциясида ахборот-коммуникация технологияларини қўллашнинг ҳозирги замон масалалари: Республика илмий-техник анжуманинг маърузалари тўплами. 3-қисм, Нукус, 2015. 429-434 б.

34. Хужаев И.К., Болтибаев Ш.К., Махкамов М.К. Периодические изменения давления и массового расхода газа при учете всех силовых факторов // Современные материалы, техника и технологии в машиностроении: Сборник научных статей. Секции 3-4, Андижан, 2016. – С. 22-26.

35. Болтибаев Ш.К. Распространение периодических возмущений гидравлического параметра газа на элементарном участке газопровода // Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении: Доклады Республиканской научно-технической конференции, Джиззак, 5-6 сентября 2016 г. – Ташкент, 2016. – С. 56-62.

36. Алиев Ф.А., Болтибаев Ш.К. Распространение периодических возмущений давления и массового расхода газа на элементарном участке газопровода // Задачи алгебры, прикладной математики и информационных технологий: материалы республиканской научной конференции. 20-21 декабря 2016. – Наманган, 2016. – С. 149-152.

37. Садуллаев Р., Хужаев И. К., Болтибаев Ш. К. Программа расчета суточных изменений расхода и давления газа в телескопических магистральных газопроводах при динамическом режиме с учетом различных внутренних и граничных условий // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 02096. 15.12.2010 г.

38. Хужаев И. К., Болтибаев Ш. К. Программа расчета изменений расхода и давления газа в элементарном участке магистрального газопровода с ресивером в периодическом режиме // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 02941. 30.12.2014 г.

39. Хужаев И. К., Бозоров О.Ш., Болтибаев Ш. К. Программа расчета изменений расхода и давления газа на элементарном участке магистрального газопровода с учетом силы инерции в периодическом режиме // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 03914. 08.08.2016 г.

Автореферат “Муҳаммад ал-Хоразмий авлодлари” илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.