

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2021.Т.142.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

АМИНОВ ХАЁТЖОН ХАЛИМЖОНОВИЧ

**РЕАЛ ГАЗЛАРНИ ҚУВУР ОРҚАЛИ УЗАТИШДА ЎТИШ
ЖАРАЁНЛАРИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

Тошкент – 2022

**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**

Аминов Хаётжон Халимжонович

Реал газларни қувур орқали узатишда ўтиш жараёнларини математик
моделлаштириш. 5

Аминов Хаётжон Халимжонович

Математическое моделирование переходных процессов при трубопроводной
транспортировке реальных газов 22

Aminov Khayotjon Khalimjonovich

Mathematical modeling of transients during pipeline transportation of real
gases41

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 45

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2021.Т.142.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

АМИНОВ ХАЁТЖОН ХАЛИМЖОНОВИЧ

**РЕАЛ ГАЗЛАРНИ ҚУВУР ОРҚАЛИ УЗАТИШДА ЎТИШ
ЖАРАЁНЛАРИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

Тошкент – 2022

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.2.PhD/T1118 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

Хужаев Исматулла Кушаевич
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Джуманов Жамолжон Худойкулович
техника фанлари доктори, профессор

Палванов Бозорбой Юсупович
техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)

Етакчи ташкилот:

«Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институти»
Миллий тадқиқот университети

Диссертация ҳимояси Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги DSc.13/30.12.2021.T.142.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «22» июль соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, М.Улуғбек тумани, Бўз-2 мавзеси, 17А уй. Тел.: (99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz)

Диссертация билан Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (11 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, М.Улуғбек тумани, Бўз-2 мавзеси, 17А уй. Тел.: (99871) 263-41-98).

Диссертация автореферати 2022 йил « » _____ да тарқатилди.

(2022 йил «13» июль даги 12 рақамли реестр баённомаси)



С.С.

Н.С. Маматов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси,
техника фанлари доктори, профессор

Ф.М. Нуралиев
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби,
техника фанлар доктори, доцент

Н.Равшанов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
техника фанлари доктори, профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда қувурлар орқали оқувчи муҳитларни ташиш, механик ва иссиқлик энергиясини узатишга мўлжалланган тизимлар кенг қўлланиб келмоқда. Узлуксиз фаолият кўрсатиш имконияти мавжудлиги, экологик ва иқтисодий жиҳатдан афзалликлари туфайли бундай тизимлар замон талабига мувофиқ мунтазам такомиллаштириб борилмоқда. Қувур тизимларининг реал вақт режимидаги фаолияти узатилаётган муҳитнинг гидро- ва газодинамик кўрсаткичлари ва қувурнинг юкланган ҳолатининг вақт ва фазода ўзгаришлари билан тавсифланади. Гидростатик босим ва импульснинг кескин ўзгаришлари қувурлар тизими муайян чизиқли қисмлари ва тармоқларидаги кўрсаткичларнинг кескин ўзгаришларнинг ҳосил бўлишига ҳамда куч қурилмалари – компрессорлар ва насосларнинг ишдан чиқишига олиб келади. Шу муносабат билан қувурларда ва қувурлар тизимларида масса сарфи, босим ва тезликнинг динамик масалаларини ўрганиш долзарб муаммодир.

Жаҳоннинг АҚШ, Канада, Россия Федерацияси, Норвегия, Германия, Қозоқистон, Ўзбекистон каби газ қазиб олувчи ва газдан фойдаланувчи кўплаб мамлакатларнинг илмий марказлари ва университетларида қувурлар орқали турли муҳитларни узатиш соҳасида кенг қамровли илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда ва бунда асосий эътибор мавжуд бўлган ёки янги тикланаётган қувур тармоқларининг ишончилигини ва ресурстежам-корлигини таъминлашга қаратилмоқда. Қувур орқали муҳитларни узатиш тармоқларининг ҳолатини мунтазам равишда мониторинг қилиш ва автоматик бошқариш тенденциялари шаклландики, уни математик моделлаштиришнинг ютуқлари ва ахборот-коммуникация технологияларининг имкониятларидан фойдаланмасдан амалга ошириш мумкин эмас.

Табиий газ Ўзбекистон Республикасида энергетика балансининг салмоқли улушини ташкил этади. Ўзбекистон газ қазиб чиқариш бўйича дунёнинг дастлабки йигирматалигига киради. Сўнгги беш йил ичида Устюрт газ-кимё мажмуаси, Қандим газни қайта ишлаш мажмуаси ва бошқа бир қатор стратегик объектлар фойдаланишга топширилди. Мамлакат табиий газнинг катта захирасига, кон ичидаги ва нафақат ички истеъмолчиларга, балки экспортга ҳам газ етказиб беришни таъминлай оладиган тармоқланган магистрал қувурлар тизимларига эга. 2017-2021 йилларга мўлжалланган Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш стратегиясида «... замонавий халқаро стандартлар ва корпоратив бошқарув усулларини жорий этиш, ... ахборот-коммуникация технологияларини иқтисодиётга, ижтимоий соҳага, бошқарув тизимларига жорий этиш»¹ вазифалари белгилаб берилган бўлиб, улар нефть ва газ соҳаларига ҳам тегишлидир. Ушбу вазифаларни амалга оширишда табиий газ транспорти тизимларининг реал вақт режимидаги фаолияти учун зарур бўлган математик моделлар, сонли

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7-февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида” ги Фармони

алгоритмлар ва дастурий воситаларни ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этади.

Мазкур диссертация иши муайян даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2020 йил 18 июндаги «Табиий газ ва электр энергиясини сотиш механизмини такомиллаштириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида» ПФ-6010-сон, 2020 йил 4 апрелдаги «Нефть ва газ тармоғининг молиявий барқарорлигини ошириш бўйича биринчи навбатдаги чора-тадбирлар тўғрисида» ПҚ-4664-сон ва 2020 йил 18 декабрда «Худудларда муҳандислик-коммуникация инфратузилмасини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПҚ-4929-сон Қарорларида ва ушбу соҳада қабул қилинган бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда кўзда тутилган вазифаларнинг бажарилишида хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Қувурлар орқали турли аралашмаларни, механик ва иссиқлик энергияларини узатиш жараёнларини ҳисоблашда квази-бир ўлчовли тенгламалардан келиб чиққан формулалардан фойдаланилади. Бу тенгламалар Навье-Стокс тўлиқ тенгламалари ҳадларини қувур қўндаланг кесими юзасига кўра ўрталаштириш усулида қурилган бўлиб, ўзида гидродинамиканинг чизиқли эмаслик хусусиятларини тўлиқ сақлаб қолган. Уларни тузиш ва ечиш усулларини ишлаб чиқиш ва амалий масалаларни ечишга жорий этиш йўналишида Жуковский Н.Е., Миркин А.З., Чарний И.А., Усиньш В.В., Попов Д.Н., Сеннова Е.Б., Сидлер В.Г., Меренков А.П., Хасилев В.Я., Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.М., Селезнев В.Е., Алешин В.В., Штеренлихт Д.В., Грачев В.В., Novitsky N.N., Alekseev A.V., Grebneva O.A., Lutsenko A.V., Tokarev V.V., Huai Su, Enrico Zio, Jinjun Zhang, Xueyi Li, Lixun Chi, Lin Fan, Zongji Zhang каби қатор мутахассислар иш олиб боришган. Н.Е. Жуковский ишлаб чиққан ва дастлаб водопроводда зарба тўлқинлари тарқалишини ўрганишга жорий этилган квази-бир ўлчовли математик модель турли омилларни – ташқи муҳит ҳарорати ва рельефи, тармоқнинг мураккаб тузилиши, қувурда кечадиган оқимнинг гидродинамик ва энергетик режимларини, конденсация ва гидратация жараёнларини ва бошқа омилларни ҳисобга олиш орқали такомиллаштирилиб борилмоқда.

Қувурлар тизими фаолияти ва уларда зарба тўлқинларининг тарқалиши масалаларини ўрганиш ва амалиётга жорий этишда ўзбекистонлик Ж.Ф.Файзуллаев, Қ.Ш.Латипов, В.К.Мукук, Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Р.Садуллаев, Ж.Акилов, Т.Юлдашев, О.В.Лебедев, Г.Қ.Аннақулова, Ф.Г.Темпель, И.К.Хужаев, О.Ш.Бозоров, М.Маматқулов, О.М.Арифжанов, С.И.Худойкулов, М.К.Маҳкамов, А.М.Фатхуллаев, У.У.Жонқобилов каби тадқиқотчиларининг хизматлари катта.

Бугунги кунда кўплаб омиллар ҳисобга олинган ҳолда қувур тармоғининг стационар ва ностационар масалаларини ҳал қилиш учун турли усуллар ишлаб чиқилган. Аммо қувур диаметри ўзгариши муаммосининг математик моделлари аниқлаштирувчи омилларни ҳисобга олган ҳолда такомиллаштиришни, зичланиш ва сийракланиш тўлқинларининг тарқалиши масалалари эса ҳар томонлама тўлиқ таҳлил қилишни талаб этишмоқда.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган муассасанинг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот коммуникация технологиялари илмий-инновацион маркази илмий тадқиқот ишлари режасининг №БВ-М-Ф4-001 – «Мураккаб иссиқлик ва модда алмашинувига доир кўп ўлчовли масалаларнинг математик моделлари ва тақсимланган самарали ҳисоблаш алгоритмлари» (2017-2020) мавзусидаги тадқиқот лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади газ ташувчи қувурларнинг элементар қисмларида кечадиган ўтиш жараёнларининг чизиқли бўлмаган масалаларини ечишнинг усуллари, алгоритмлари ва дастурий таъминотини ишлаб чиқиш ва такомиллаштиришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

қувурлар ёрдамида модда, иссиқлик ва механик энергияларни узатиш жараёнларининг илмий асосларини ва ўрганиш усуллари таҳлил этиш;

қисқа қувур яқинлашувида элементар қисм охирида босим ва масса сарфининг ўзгариши масалаларини характеристикалар усулида ечимини куриш ва ҳисоб ишлари учун дастурий таъминот ишлаб чиқиш;

Н.Е.Жуковскийнинг чексиз фазога газ оқиб чиқиши тезлигининг чекланганлиги ҳақидаги гипотезаси асосида газ қувури элементар қисми ҳолатига доир масалани шакллантириш, ечимини топиш ва сонли тажрибалар ўтказиш;

масофага боғлиқ равишда рельефи ва кўндаланг кесими юзаси ўзгарувчан газ қувурлари учун чизиқсиз математик модель, сонли алгоритм ва дастурий восита ишлаб чиқиш ва улар ёрдамида қарама-қарши тўлқинлар тарқалишига доир сонли тажрибалар ўтказиш.

Тадқиқот объекти сифатида газ қувурлари фаолияти ва уларда тўлқин тарқалиши жараёнлари қаралди.

Тадқиқот предметини элементар газ қувурида ностационар жараёнларда кечадиган газодинамик ўзгаришлар ташкил этишди.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқотни олиб бориш жараёнида математик моделлаштириш, математик физиканинг характеристикалар ва сонли усулларида, инфокоммуникацион технологияларнинг сонли натижаларни визуаллаштириш усулларида фойдаланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгиликлари қуйидагилардан иборат:

қисқа қувурларнинг ностационар газодинамик ҳолатига доир чизиқли бўлмаган масалаларнинг турли чегаравий шартлар, жумладан номаълум ўзгарувчилар биргаликда қатнашган ҳол учун ечимлари чизиқлилаштириш ва

характеристикалар усуллари ёрдамида қурилган ҳисоблаш алгоритми яратилган;

характеристикалар усулида қурилган ечимлар асосида қисқа қувур киришидаги босим ва чиқишидаги масса сарфининг сакраб ўзгаришида қувур қисмида даври турлича бўлган ҳолатнинг юзага келиши, чегараларда масса сарфининг ўзгариши туфайли қисмда босимнинг ортиши, камайиши ва даврий ўзгариши рўй бериши, чегара учун Н.Е.Жуковский формуласи қўлланилганида лимит ҳолатига ўтиш мавжудлиги каби хусусиятлар ишлаб чиқилган;

ёрдамчи функция киритиш орқали диаметри ва нивелир баландлиги йўл-йўлакай ўзгарувчи газ қувурлари ҳолати тенгламаларидан қарама-қарши югурувчи тўлқинлар тенгламаларига ўтиш усули ишлаб чиқилган;

қарама-қарши югурувчи тўлқинларнинг чизиқли бўлмаган тенгламалари системасини ечиш учун ишлаб чиқилган ҳисоблаш усули, алгоритми ва дастурий воситалар ёрдамида қувур кўндаланг кесими юзасининг маҳаллий кенгайиши ҳисобига импульс сакрашларини самарали сўндириш усули таклиф этилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

ностаціонар жараёнларда қисқа қувурларда босим ўзгариши интервалини аниқлаш имкони яратилган;

гидравлик ҳисобларда рельеф ва кўндаланг кесим юзаси ўзгаришларини ҳисобга олиш усули таклиф этилган;

қувур қисмида кўндаланг кесим юзасини маҳаллий ошириш орқали импульс сакрашларини сўндириш мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги фойдаланилган тенгламалар ва шартларнинг масса ва импульс сақланиши қонунларига қатъий мослиги, аналитик ечимларни олишда тан олинган классик усулдан фойдаланилганлиги, сонли ечим олишда зарурий аниқлик, ҳисоблаш жараёнининг турфунлиги ва яқинлашувчанлиги таъминланганлиги, натижаларнинг ўрганилаётган жараёнлар табиатига мос эканлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти рельефи ва кўндаланг кесими юзаси ўзгарувчан қувурларни оддий фаолият ва импульс тарқалиши ҳолатларида ҳисоблаш услубияти ишлаб чиқилгани билан ифодаланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти олинган ечимлардан газ қувурлари тизимида босим сакрашларини илмий башоратлаш, лозим ҳолда уларни сўндириш орқали тизимнинг ишончлилигини ошириш мақсадида фойдаланиш мумкинлиги ва бу мақсадга йўналтирилган дастурий воситалар яратилганлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. «Реал газларни қувур орқали узатишда ўтиш жараёнларини математик моделлаштириш» мавзусида бажарилган диссертация ишида олинган натижалар қуйидаги корхоналарда жорий қилинган:

карама-қарши югурувчи тўлқинларнинг чизикли бўлмаган тенгламалари системасини ечиш учун ишлаб чиқилган ҳисоблаш усули ва дастурий воситалар «Худудгаз Фарғона» газ таъминоти филиалида қўлланилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 03 ноябрдаги 33-8/7765-сон маълумотномаси, Ўзбекнефтгаз АЖ нинг 2021 йил 08 ноябрдаги 03-17-5/171-сон маълумотномаси). Натижада ҳисоблаш жараёнига кетадиган вақтни 12-16%га қисқартириш, аниқликни 10-11%га ошириш ва қурилманинг узлуксиз ишлашининг имкони яратилган;

карама-қарши югурувчи тўлқинларнинг чизикли бўлмаган тенгламалари системасини ечиш учун ишлаб чиқилган ҳисоблаш усули «Universal elegant luuks» МЧЖ қарамоғидаги қувурлар тизимида қўлланилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 03 ноябрдаги 33-8/7765-сон маълумотномаси). Натижада босим сакрашларини ҳисоблаш жараёнига кетадиган вақтни 15-20%га қисқартириш, аниқликни 12 %га ошириш ва қурилманинг узлуксиз ишлаши имконини берган;

қисқа қувурларнинг ностационар газодинамик ҳолатига доир чизикли бўлмаган масалаларнинг турли чегаравий шартлар, жумладан номаълум ўзгарувчилар биргаликда қатнашган ҳол учун ечимлари чизиклилаштириш ва характеристикалар усуллари ёрдамида қурилган ҳисоблаш алгоритми «Водий Шамс Электрон Мантаж» МЧЖда қўлланилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 03 ноябрдаги 33-8/7765-сон маълумотномаси). Натижада қурилманинг энергия сарфини 10%га камайтиришга, ишончилигини 20 %га оширишга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 2 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 24 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 9 та мақола, 5 таси республика ва 4 таси хорижий журналларда нашр этилган. ЭҲМ учун дастурий маҳсулот қайд этилганлиги ҳақида 2 гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 112 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Ишнинг **Кириш** қисмида Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мос равишда диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқотнинг объекти ва предмети кўрсатиб берилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён

қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган ва назарий ҳамда амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижалари амалиётга жорий этилганлиги, чоп этилган ишлар ва диссертация ишининг тузилиши ҳақида маълумотлар келтириб ўтилган.

Диссертациянинг биринчи бобида «Газ қувури тармоқларининг асосий таркибий қисмлари ва уларни ҳисоблашнинг хусусиятлари» баён этилган. У тўрт параграфдан иборат.

§1.1 да қувур тармоқлари ва уларнинг хусусиятлари муҳокама қилинган.

Қувур тизимлари суяқ, газсимон, газ-суяқлик ва қаттиқ аралашмали маҳсулотларни бошланғич – манба нуқтасидан якуний нуқта – истеъмолчигача ташувчи тузилмалардир. Улар мақсадли маҳсулотни – нефть, нефть маҳсулотлари, газ, сув, ..., иссиқлик ва механик энергияни ташишади ва вакуум ($p < 0.1 \text{ МПа}$), напорсиз ($p = 0.1 \text{ МПа}$) режимларда, шунингдек паст ($0.1 \text{ МПа} < p < 1.6 \text{ МПа}$), ўрта ($1.6 \text{ МПа} \leq p \leq 10 \text{ МПа}$) ва юқори ($p > 10 \text{ МПа}$) босим режимларида ишлайдилар. Ташиладиган муҳитнинг ҳарорати паст ($< -40^\circ\text{C}$), ўрта ($-40^\circ\text{C} \dots 450^\circ\text{C}$) ва юқори ($> 450^\circ\text{C}$) бўлиши мумкин. Қувур тармоқлари арматура – бошқарувчи қурилмалар билан таъминланишади. Ушбу параграфда газ саноати чизиқли ва нуқтавий элементлардан тузилган тармоғининг тузилиши конлардаги газ йиғиш коллекторларидан бошлаб истеъмолчигача тарқатилишигача муҳокама этилган.

§1.2 да илк маротаба Навье-Стокс тўлиқ тенгламаларини кўндаланг кесим юзаси бўйича ўрталаш йўли билан Н.Е.Жуковский томонидан ишлаб чиқилган газ ва суяқликларни қувур орқали ташишнинг квази-бир ўлчовли математик модели келтирилган. Унинг тенгламалар тизими ҳали ҳам муайян тузатишлар ва қўшимчалар билан қувур транспорти жараёнини ўрганишда қўлланилмоқда. Ўзгарувчан кўндаланг кесим юзаси $f(x) = \pi D^2(x) / 4$ ли қувурлар учун тенгламаларнинг замонавий кўриниши куйидагича:

$$\begin{cases} \frac{\partial(f\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(f\rho w)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial(\rho w f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w^2 f)}{\partial x} = -f \left(\frac{\partial p}{\partial x} + g\rho \frac{dy}{dx} \right) - \frac{\pi}{8} \lambda \rho w |w| D, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho f \left(\varepsilon + \frac{w^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho w f \left(\varepsilon + \frac{w^2}{2} \right) \right] = - \frac{\partial(\rho w f)}{\partial x} - \\ - \rho g f w \frac{\partial y}{\partial x} - p \frac{df}{dt} + Qf + \frac{\partial}{\partial x} \left(kf \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \Phi(T, T_a). \end{cases} \quad (1)$$

Бу ерда $p(x,t)$, $\rho(x,t)$, $w(x,t)$, $T(x,t)$ – x кесим ва t вақт momentiда ташилаётган газ босими, зичлиги, тезлиги ва ҳароратининг ўртача қийматлари; $y = y(x)$ – қувур ўқининг нивелир баландлиги; g – гравитация кучининг тезланиши; λ – ишқаланиш қаршилиги коэффиценти; $\varepsilon = c_v T$, $w^2 / 2$ – газнинг солиштирма ички ва кинетик энергияси; c_v – модданинг солиштирма изахорик иссиқлик сифими; Q – ички энергия манбаларининг

солиштирма катталиги; k – газнинг иссиқлик узатиш коэффициентини; $-\Phi(T, T_a)$ – ҳарорати T_a бўлган ташқи муҳитга газ иссиқлигининг узатилиши.

Система (1) реал газнинг ҳолат тенгламаси билан тўлдирилади:

$$p = Z\rho RT, \quad (2)$$

бу ерда Z – газнинг сиқилувчанлиги (ўта сиқилувчанлиги) коэффициентини; $R = R_0 / \mu$; $R_0 = 8.3143 \text{ Ж} / (\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – келтирилган ва универсал газ доимийси; μ – газнинг моляр массаси.

Ҳар бир масала учун (1) ва (2) тенгламалар ечимларининг ягоналигини таъминловчи бошланғич ва чегаравий шартлар шакллантирилади ва чизиқли бўлмаган (1) ва (2) тенгламалар системаси ечимнинг талаб этилган аниқлигига қараб соддалаштирилади.

Муҳандислик амалиётида (§1.3) қўзғалиш манбаларидан етарлича узоқ масофада шаклланган стационар оқим режими учун (1) ва (2) тенгламалар системасидан келиб чиқадиган формулалардан фойдаланилади. Хусусий ҳолда, киришдаги босим p_0 бўлганида газ қувурининг горизонтал қисмида

босимнинг ўзгариши $p(x) = \sqrt{p_0^2 - \frac{\lambda ZR}{Df^2} M^2 x}$ формула ёрдамида аниқланади;

бу ерда $M = f\rho w$ – газнинг масса сарфи.

Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.М., Коротаев Ю.П., Ширковский А.И., Файзуллаев Д.Ф., Igwilo K., Okoro E., Nwude A., Mamudu A., Onuh C., Abbasov E., Agayeva G., Agayeva N., Kengerli T., Atena A., Tekalign W., Muche T., Акбасов А.Р., Меренков А.П., Хасилев В.Я., Сеннова Е.В., Сидлер В.Г., Садуллаев Р., Хужаев И.К. ва бошқа олимларнинг материаллари асосида газ қувурлари элементар қисми ва тармоғининг гидравлик ҳисобида ҳарорат ва трасса нишаблигининг ўзгарувчанлигини ҳисобга олиш вариантлари муҳокама қилинди.

§1.4 да ностационар иш режимида элементар қисм ва газ тармоғини ҳисоблаш усуллари муҳокама қилинган. Илмий манбаларга асосланиб, (1) ва (2) тенгламаларни, шунингдек уларнинг соддалаштирилган вариантларини ечишнинг аналитик ва сонли усуллари санаб ўтилди. Турли хил ички (конденсация, гидратация, Жоуль-Томсон эффекти) ва ташқи (ҳарорат, транспорт тизимлари, трасса рельефи ва бошқа) омилларни ҳисобга олиш вариантлари муҳокама қилинди.

Илмий манбаларнинг таҳлили ва газ саноатининг долзарб муаммолари асосида тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилди.

Диссертациянинг иккинчи боби қисқа қувур яқинлашуви доирасида **«Магистрал газ қувурининг чизиқли қисмига доир масалаларни ечиш учун характеристикалар усулини қўллаш»**га бағишланган. Унда газодинамик параметрларнинг маълум бошланғич тақсимотлари учун турли чегаравий шартларда уч масаланинг ечимлари олинган ва таҳлил қилинган.

§2.1 да газ қувури тармоғининг компрессор, қувур ва истеъмолчидан иборат энг оддий схемаси қаралган. Компрессор кириш босими $\psi_0^{(p)}(t)$ ни таъминлайди, истеъмолчи масса бўйича $\psi_0^{(M)}(t)$ жадалликда газ олади.

Горизонтал газ қувири қисмининг кўрсаткичлари газ бошланғич $p_0(x)$ босими ва тезлиги $w_0(x)$ тақсимотлари ҳолида қисқа қувиур яқинлашувидаги импульснинг сақланиши

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial t} = 0$$

қонунига мувофиқ ўзгаради ва массанинг сақланиш қонуни бажарилади:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho w}{\partial x} = 0.$$

Газ ҳолати реал газ қонуни $p(x,t) = c^2 \rho(x,t)$ га бўйсунди, бу ерда $c = \sqrt{ZRT}$ – кичик босим қўзғалишлари тарқалиш тезлиги.

$M = f \rho w$ масса сарфини киритиш ва югурувчи тўлқин аналогларига

$$u(x,t) = p(x,t) + \frac{c}{f} M(x,t), \quad v(x,t) = p(x,t) - \frac{c}{f} M(x,t)$$

ўтиш билан гиперболик тенгламалар системаси тузилди:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} - c \frac{\partial v}{\partial x} = 0.$$

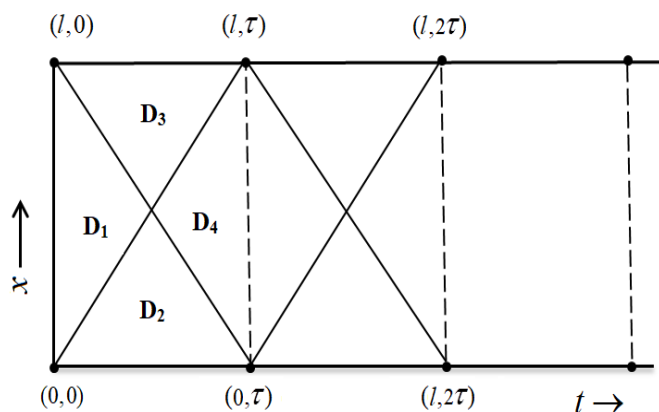
Янги киритилган изланувчи функциялар учун бошланғич

$$u(x,0) = p_0(x) + \frac{c}{f} M_0(x) = \varphi_0^{(u)}(x), \quad v(x,0) = p_0(x) - \frac{c}{f} M_0(x) = \varphi_0^{(v)}(x)$$

ва чегаравий

$$u(0,t) + v(0,t) = 2\psi_0^{(p)}(t), \quad u(l,t) - v(l,t) = \frac{2c}{f} \psi_0^{(M)}(t)$$

шартлар шакллантирилди.



1-расм. Ечим соҳасининг вақт оралиқлари ва соҳаостиларга бўлиниши

Ечим соҳаси ўзгармас $\tau = l/c$ қадам билан вақт оралиқларига ва ҳар бир вақт оралиғи D_1, D_2, D_3 ва D_4 соҳаостиларга бўлинди (1-расм).

$x = \pm ct + const$ характеристикалари бўйлаб чегаравий ва бошланғич шартларнинг сақланишини ҳисобга олган ҳолда, янги киритилган функцияларнинг биринчи вақт қадамидаги қийматлари аниқланди:

$$D_1 \cup D_2 \text{ соҳаостида} - v(x,t) = \varphi_0^{(v)}(x+ct),$$

$$D_1 \cup D_3 \text{ соҳаостида} - u(x,t) = u(x-ct,0) = \varphi_0^{(u)}(x-ct),$$

$$D_2 \cup D_4 \text{ соҳаостида} - u(x,t) = 2\psi_0^{(p)}\left(t - \frac{x}{c}\right) - \varphi_0^{(v)}(ct-x),$$

$$D_3 \cup D_4 \text{ соҳаостида} - v(x,t) = \varphi_0^{(u)}(2l-x-ct) - \frac{2c}{f} \psi_0^{(M)}\left(t - \frac{l-x}{c}\right).$$

Ушбу муносабатларга мос равишда биринчи вақт оралиғи $t \in (0, \tau]$ учун масаланинг ечими курилди:

$$p(x,t) = \frac{1}{2}[u(x,t) + v(x,t)], \quad M(x,t) = \frac{f}{2c}[u(x,t) - v(x,t)], \quad w(x,t) = \frac{c^2}{f} \frac{M(x,t)}{p(x,t)}.$$

Муайян вақт оралиғининг охирида олинган ечимлардан кейинги вақт оралиғининг бошланғич шартлари сифатида фойдаланиш мумкин. Ушбу принцип асосида вақтнинг кейинги ораликлари учун ечим олишнинг алгоритми курилди.

Дастурий маҳсулот шаклида амалга оширилган хусусий ҳолда бошланғич ва чегаравий шартларда қатнашаётган функцияларнинг ўзгармас қийматлари $p_0(x) = p_0$, $M_0(x) = M_0$, $\psi_0^{(p)}(t) = \psi^{(p)}$, $\psi_0^{(M)}(t) = \psi^{(M)}$ учун рекуррент формулалар курилди:

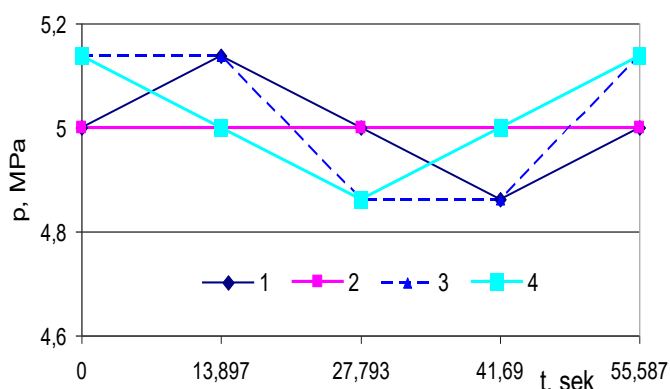
$$D_1 \text{ соҳаостида} - p_n(x,t) = p_{n-1}, \quad M_n(x,t) = M_{n-1};$$

$$D_2 \text{ соҳаостида} - p_n(x,t) = \psi^{(p)}, \quad M_n(x,t) = M_{n-1} + \frac{f}{c}(\psi^{(p)} - p_{n-1});$$

$$D_3 \text{ соҳаостида} - p_n(x,t) = p_{n-1} + \frac{c}{f}(M_{n-1} - \psi^{(M)}), \quad M_n(x,t) = \psi^{(M)};$$

$$D_4 \text{ соҳаостида} - p_n(x,t) = \psi^{(p)} + \frac{c}{f}(M_{n-1} - \psi^{(M)}), \quad M_n(x,t) = \psi^{(M)} + \frac{f}{c}(\psi^{(p)} - p_{n-1}).$$

График кўринишидаги намунавий натижалар 2-расмда келтирилган.



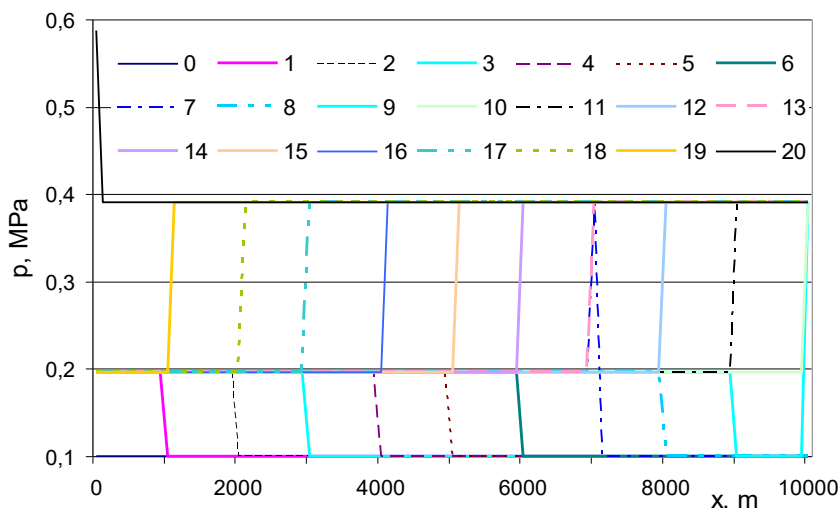
2-расм. Вақт масштаби τ нинг тўрт баробарига тенг даврда босимнинг D_1 (1-чизик), D_2 (2), D_3 (3) ва D_4 (4) соҳаостидаги дискрет қийматлари.
 $c = 359.80 \text{ м / с}$, $D = 1.0 \text{ м}$,
 $l = 5000 \text{ м}$, $p_0 = \psi^{(p)} = 5 \text{ МПа}$,
 $M_0 = 300 \text{ кг / с}$, $\psi^{(M)} = 0 \text{ кг / с}$

Ҳисоблаш натижаларининг таҳлили ечим 4τ даврга эга эканлигини кўрсатди. Яъни, кўзғалишлар сўнмас характерга эга. Кўрсаткичларнинг сакраб ўзгариши қувур қисмининг бир охирида бўлганида фақат бир соҳаостида кўрсаткичларнинг ҳар бир вақт оралиғидаги ўзгариши кузатилади (2-расм 3-чизик), акс ҳолда янги вақт оралиғида ўтишда ҳар бир соҳаостида кўрсаткичларнинг сакраб ўзгариши рўй беради.

§2.2 да газнинг масса сарфининг қувур охирларида вақтга боғлиқ ўзгариши берилган ҳолдаги масала юқорида кўрсатилган тарзда ечилди.

Ўтказилган ҳисоблаш тажрибалари кўрсатишича, масса сарфининг қувурнинг фақат бир охирида сакраб ўзгариши ҳолида $t = \tau$ дан кейин масса сарфи қиймати 2τ даврга, қувурнинг ҳар икки охирида масса сарфининг сакраб ўзгаришида эса у τ даврга эга бўлади.

Киришдаги масса сарфи чиқишдаги масса сарфидан катта бўлганида қувур қисмида газ босими мунтазам ўсиб боради (3-расм) ва аксинча. Агар кириш ва чиқишдаги янги масса сарфларининг қийматлари ўзаро тенг бўлса босимнинг ўзгариши даврийлик таснифига эга бўлади. Барча ўтиш жараёнларида газ тезлигининг вақт ўтиши билан нолга интилиши кўрсатилди.



3-расм. $0 \leq t \leq 2l / c$ вақт оралиғида киришдаги масса сарфининг катта бўлган ҳолида газ босимининг ўзгариши.

$$p_0 = 0.1 \text{ МПа},$$

$$\psi_0^{(0)} = 200 \text{ кг / с},$$

$$M_0 = \psi_0^{(l)} = 0 \text{ кг / с},$$

$$l = 10 \text{ км}, D = 1.0 \text{ м},$$

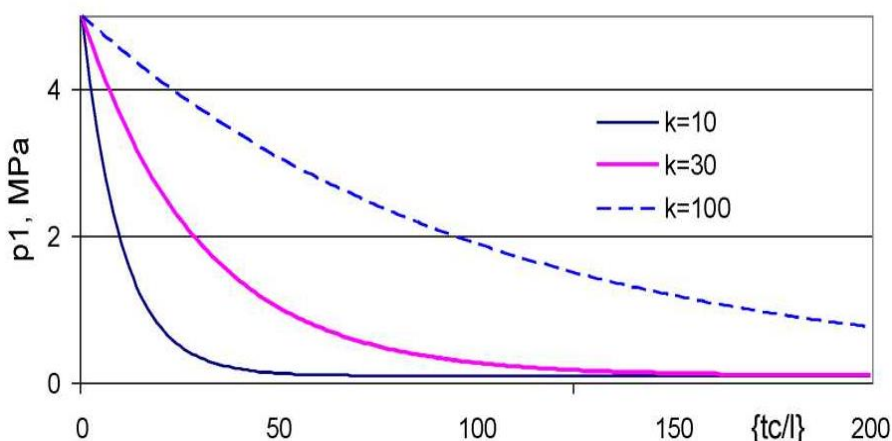
$$c = 379.93 \text{ м / с}$$

§2.3 да қувур қисми кириш кесимида газ масса сарфининг ўзгариш қонуни ва чиқиш кесимида газнинг (штуцер орқали) чексиз фазога оқиб чиқиш тезлиги чекланганлиги ҳақидаги Н.Е. Жуковский гипотезасига мос шарт берилган ҳол учун ечим олинган. Айни ҳолда у қуйидагича ёзилди:

$$p(l,t) - \psi_l(t) = \alpha f \rho(l,t) w(l,t),$$

бу ерда $\psi_l(t)$ – қувур билан туташган чексиз фазодаги босим қиймати; $\alpha = c/s$; s, f – штуцер ва қувур кўндаланг кесим юзалари.

Бу чизиқли бўлмаган чегаравий шарт ҳар учала номаълумни ўз ичига олган. Шунга қарамай, мос шакл алмаштиришларни қўллаш орқали у чизиқли кўринишга келтирилди ва масала характеристикалар усулида ечилди. Сонли натижалар бошланғич ва чегаравий шартлардаги функцияларнинг ўзгармас қийматлари учун олинди. 4-расмда газнинг қувур қисмидан оқиб чиқишида D_1 соҳаостида босим динамикаси акс эттирилган.



4-расм. $k = f/s$ нинг уч қийматида D_1 соҳаостида босимнинг вақтга боғлиқ ўзгариши. $D = 1 \text{ м},$

$$p_0 = p_e = 5.0 \text{ МПа},$$

$$p_a = 0.1 \text{ МПа},$$

$$l = 5000 \text{ м},$$

$$c = 359.80 \text{ м / с}$$

Олдинги параграфда олинган $t \rightarrow \infty$ даги $p(x,t) \rightarrow \pm \infty$ ечимлардан фаркли равишда бу ҳолда газ босимининг экспоненциал қонун билан очик фазо босимига интилиши аниқланди. Бу қаралаётган объектнинг табиатига мос келади.

Диссертациянинг учинчи боби «Ўзгарувчан диаметрли қувурларда масса ва импульс сақланиши қонунлари ва импульс фронти тарқалишининг математик модели, ҳисоблашнинг усули ва алгоритми» ўзгарувчан кўндаланг кесим юзали газ қувурларида газ ташишнинг изотермик масалалари учун математик модель ва алгоритм ишлаб чиқишга бағишланган.

Жараёни моделлаштиришда барча куч омиллари ҳисобга олинди:

$$-f \frac{\partial p}{\partial x} = f \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\lambda f}{2D} \rho w |w| + f \rho g \sin \alpha + f \rho w \frac{\partial w}{\partial x}, \quad -f \frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho f w)}{\partial x}, \quad p = c^2 \rho.$$

Бошланғич шартнинг иккита варианты – газнинг тинч ($w(x,0) = 0$ м/с) ҳолатида босимнинг барометрик тақсимланиши ва газ масса сарфининг ўзгармас ($M(x,0) = M_0(x) = const$) ҳолатлари қаралди. Иккинчи вариант учун тезлик $w(x,0)$ ва босимнинг бошланғич тақсимланиши $p(x,0)$ сонли усулда аниқланди. Қувур қисмига киришда босимнинг ($p(0,t) = p_0(t)$), чиқишда эса газ масса сарфининг ($M(l,t) = M_l(t)$) вақтга боғлиқ ўзгариши берилди.

l узунлик, c тезлик ва l/c вақт масштабларидан фойдаланиб, тенгламалар ва шартлар ўлчамсиз кўринишга келтирилди. Янги ўзгарувчи $\ln \frac{f \rho}{f_* \rho_*}$ (f_* , ρ_* – кўндаланг кесим юзаси ва газ зичлигининг таснифли кийматлари) киритиш орқали тенгламалар системаси қуйидаги шаклга келтирилди:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}} = 2 \frac{\partial \ln(D/D_*)}{\partial \bar{x}} - \frac{gl}{c^2} \sin \alpha - \frac{\lambda l}{2D} \bar{u} |\bar{u}|, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} = 0.$$

Ушбу гиперболик тенгламалар системаси асосий матрицаси $A = \begin{vmatrix} \bar{u} & 1 \\ 1 & \bar{u} \end{vmatrix}$ нинг хос сонларидан иборат $\Lambda = \begin{vmatrix} \bar{u} + 1 & 0 \\ 0 & \bar{u} - 1 \end{vmatrix}$ диагонал, хос векторларидан

иборат фундаментал $V = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}$ матрицалар тузилди.

Бу матрицалардан фойдаланиб янги тенгламалар системаси тузилди:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + (1 + \bar{u}) \frac{\partial f_1}{\partial \bar{x}} = F, \quad \frac{\partial f_2}{\partial t} - (1 - \bar{u}) \frac{\partial f_2}{\partial \bar{x}} = F,$$

бу ерда $f_1(\bar{x}, \bar{t}) = \bar{u}(\bar{x}, \bar{t}) + \bar{\varphi}(\bar{x}, \bar{t})$, $f_2(\bar{x}, \bar{t}) = \bar{u}(\bar{x}, \bar{t}) - \bar{\varphi}(\bar{x}, \bar{t})$ – қарама-қарши югурувчи тўлқинлар; $F = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\ln \frac{D}{D_*} \right) - \frac{gl}{c^2} \sin \alpha - \frac{\lambda l}{2D} \bar{u} |\bar{u}|$.

Ушбу шакл алмаштиришларга мос равишда масаланинг шартлари шакллантирилди. Узунлик бўйича h ва вақт бўйича τ ўзгармас қадамлар билан дискрет $i = x/h$ ва $n = t/\tau$ координаталар ва тўр функциялар киритилди.

Ишда қувур ўқи нивелир баландлиги ва кўндаланг кесими юзасининг йўл-йўлакай ўзгаришларининг турли ҳоллари, жумладан эгри чизиқли трасса учун стационар масалаларнинг ечимлари олинди ва улар ностационар масаланинг бошланғич шартлари бўлиб хизмат қилишди.

Тенгламалар чизиқли бўлмаганлиги туфайли ҳар бир n -вақт қадамида итерация жараёни ташкил этилди. Ҳаракат йўналишини ҳисобга олган ҳолда $f_{1i}^{n,s+1}$ нинг қиймати f_{2i}^n дан фойдаланиб чапдан ўнгга, f_{1i}^{n+1} дан фойдаланган ҳолда эса f_{2i}^{n+1} нинг қиймати ўнгдан чапга қараб ҳисобланди.

f_{1i}^{n+1} қийматлари – $i=0$ да $f_{10}^{n+1,s} = \bar{u}_0^{n+1,s} + \varphi_0^{n+1,s}$ формула, $i=N-1...0$ да эса $\sigma = \tau/h$ белгилаш киритилиб, қуйидаги формула асосида ҳисобланди:

$$f_{1i}^{n+1,s} = \frac{f_{1i}^n + \sigma(1+u_i^n)f_{1i-1}^{n+1,s} + \tau \Phi_{1i}^n}{1 + \sigma(1+u_i^n)}.$$

Қувур чиқиш кесимидаги шарт трансцендент тенглама $e^{\varphi(1,\bar{t})} \bar{u}(1,\bar{t}) = \bar{Q}_l(\bar{t})$ шаклини олди, бу ерда $\bar{Q}_l(\bar{t}) - x=l$ да газ олишнинг келтирилган жадаллиги.

Охирги тенгламадан $\bar{Q}_l(\bar{t}) \neq 0$ ҳолида $\bar{u}_N^{n+1,s} = \bar{u}$ ни топиш учун Ньютон уринмалар усулидан фойдаланилди. $|\bar{u}^{k+1} - \bar{u}^k| < 10^{-8}$ аниқлик таъминлангунча

$$\bar{u}^{k+1} = \bar{u}^k + \frac{e^{-f_{1N}^{n+1,s}} \bar{Q}_l^{n+1} - \bar{u}^k}{1 - \bar{u}^k}$$

формула асосида итерация жараёни давом эттирилди.

$\bar{Q}_l(\bar{t}) = 0$ ҳолида эса $\bar{u}_N^{n+1,s} = 0$ деб қабул қилинди.

Топилган $\bar{u}_N^{n+1,s}$ нинг қийматидан фойдаланиб, $\varphi_N^{n+1,s}$ ва $\bar{f}_{2N}^{n+1,s}$ ҳисобланди.

$i = N - 1...0$ тугунлар учун қуйидаги формула ишлатилди:

$$f_{2i}^{n+1,s} = \frac{f_{2i}^{n+1,s} + \sigma(1-\tilde{u}_i^n)f_{2i+1}^{n+1} + \tau \Phi_{2i}^n}{1 + \sigma(1-\tilde{u}_i^n)}.$$

Охирги икки итерация учун f_{1i} ва f_{2i} қийматлари орасидаги фарқлар абсолют қийматларининг максимал қийматига қараб итерация жараёни давом эттирилди ёки тўхтатилди.

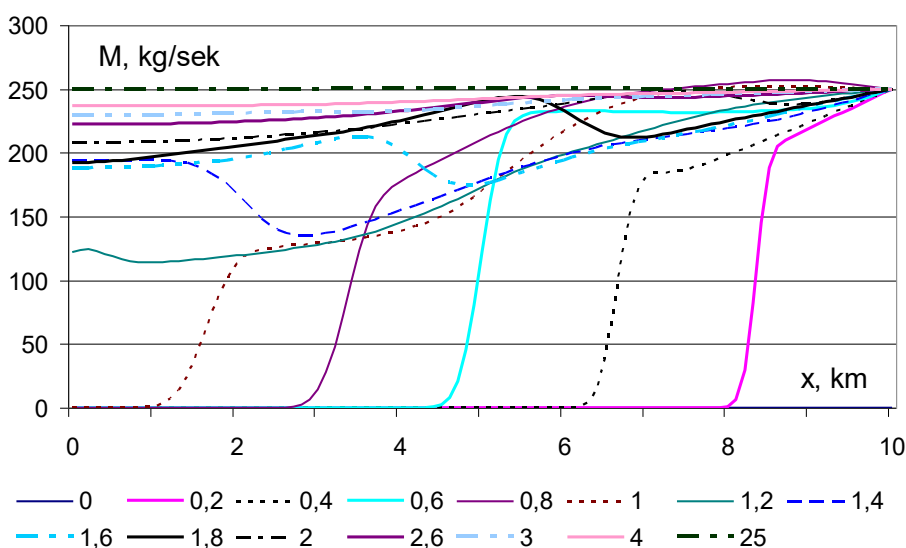
Қувур диаметрининг маҳаллий синусоидал ўзгариши

$$D(x) = \begin{cases} D_1, & \frac{x}{l} < 0.3 \cup \frac{x}{l} > 0.7 \text{ да,} \\ D_1 + \beta D_1 \sin \left[\frac{\pi}{0.4} \left(\frac{x}{l} - 0.5 \right) \right], & 0.3 \leq \frac{x}{l} \leq 0.7 \text{ да} \end{cases}$$

учун ҳисоблаш дастури тузилди.

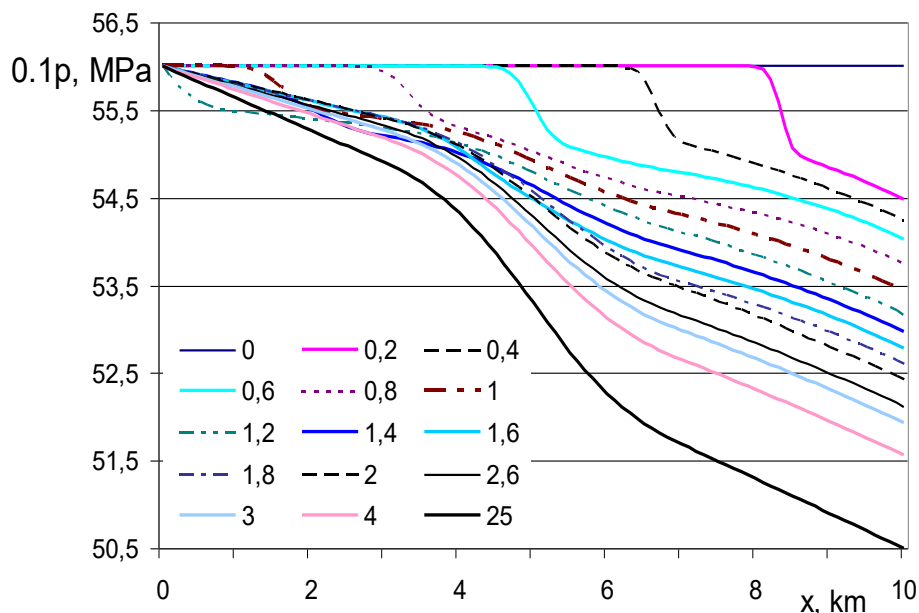
Ҳисоблашлар β параметрнинг ноль, турли мусбат ва манфий қийматларида $l=10$ км, $D=1.0$ м, $\lambda=0.028$, $T=300$ К, $\rho_*=0.699$ кг/м³, $c=378,2$ м/с, $z=0.92$ берилганлар учун ўтказилди. Хусусий $\beta=0$ ҳолда босим, масса сарфи ва тезликка доир натижалар И.К.Хужаев ва Х.А.Мамадалиевнинг натижаларига мос келди.

Бошланғич $u(x,0)=0$ м/с шарт учун туркум ҳисоблар ўтказилди. $\beta=0.5$, $p(x,0)=p(0,t)=5.6$ МПа, $M(l,t)=250$ кг/с учун олинган натижалар кенгайган соҳага етиб боргунча кўрсаткичларнинг $\beta=0$ ҳолдагиларга мос келишини кўрсатди (5-расм). Кенгайган соҳада газ масса сарфи ўзининг янги қийматига яқин бўлди.



5-расм.
Диаметрнинг $\beta=0.5$ га мос маҳаллий синусоидал катталашувида газ масса сарфининг динамикаси.
 $p(x,0)=p(0,t)=5.6$ МПа,
 $M(l,t)=250$ кг/с

Барча $\beta \neq 0$ ҳолларида босим чизиклари уч бўғинли бўлди. 6-расмда $\beta=-0.2$ ҳол учун босимнинг қувур узунлиги бўйлаб ўзгаришининг типик динамикаси келтирилган. Бу ҳол бошланғич $p(x,0)=5.6$ МПа босим ўрнатилган қувур охиридан газнинг $M(l,t)=250$ кг/с жадаллик билан олиб бошланишига тўғри келади.



6-расм. Қувурнинг тораювчи қисмида оқимнинг барқарорлашуви ҳолида босим эгри чизиклари. $\beta=-0.2$, $D_1=1$ м

Ҳисобларнинг бошқа туркуми бир маромда ишлаб турган қувур қисмида янги масса сарфига ўтиш жараёнини ўрганиш мақсадида ўтказилди. Бу ҳолларда ҳам маҳаллий кенгайиш ва торайишга эга қувур қисмида импульс сакрашларининг тарқалиши, қайтиши ва сўнишини кузатишга эришилди.

Бобнинг барча сонли натижалари узунлик ва вақт бўйича ўлчовсиз қадамлар $h = 0.001$ ва $\tau = 0.0002$ учун олинди ва уларда $\max_{0 \leq i \leq N} |f_{1i}^{n+1,1} - f_{1i}^{n+1,0}| < 0.001$, $\max_{0 \leq i \leq N} |f_{2i}^{n+1,1} - f_{2i}^{n+1,0}| < 0.001$ шартларнинг бажарилишига ва импульс сакраши атрофидаги осцилляцияларни бартараф этишга эришилди. Охирги яқинлашувларда $\max_{0 \leq i \leq N} |M_i / M_i(t) - 1| < 0.001$ шартнинг бажарилиши натижаларнинг ишончлилигидан далолат беради.

Диссертациянинг «Реал газларни қувур орқали узатишда ўтиш жараёнларини тадқиқ қилиш учун дастурий таъминот» деб номланган тўртинчи бобда олдинги бобларда келтирилган сонли натижаларни олиш учун ишлаб чиқилган дастурларнинг таснифи келтирилган.

Иккинчи бобда олинган натижаларнинг ишончлилиги Гюгонио шартларининг – зарба тўлқин орқали ўтиш ва қувур охирларида тўлқин қайтишлари жараёнларида импульс, напор ва энергиянинг изотермик ҳолда сақлаб қолиниши шартларининг қаноатлантирилиши билан исботланди.

Иккинчи бобнинг сонли натижалари уч аналитик ечим асосида тузилган ҳисоблаш дастури (DGU № 13916)дан фойдаланиб олинди. Дастурнинг тузилиши, интерфейси ва имкониятлари §4.1да муҳокама этилган.

УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

$L =$ <input style="width: 80%;" type="text"/>	$T =$ <input style="width: 80%;" type="text"/>
$D =$ <input style="width: 80%;" type="text"/>	$p_0 =$ <input style="width: 80%;" type="text"/>
$\lambda =$ <input style="width: 80%;" type="text"/>	$M_0 =$ <input style="width: 80%;" type="text"/>

Биринчи масала

Иккинчи масала

Учинчи масала

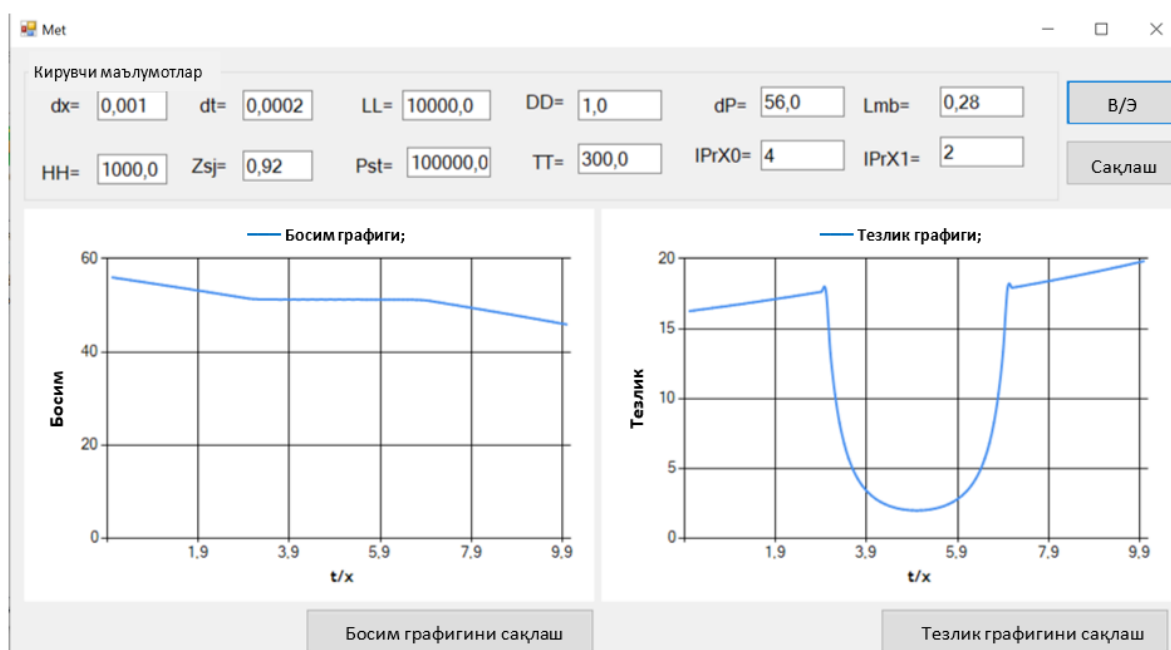
7-расм.
Характеристикалар усулида олинган ечимлар асосида ишлаб чиқилган дастурнинг умумий маълумотлар ва алоҳида масалага ўтиш ойнаси

Дастурнинг Кириш қисмида скаляр ва вектор катталиклар тавсифланган. Вектор катталиклар вақтнинг бошланғич қадами учун босим, масса сарфи ва газ тезлигининг қувур узунлиги бўйича берилган қийматларидан иборат. Ишчи ойнада учта масала учун умумий бўлган маълумотлар киритилади (7-расм): қувур қисми узунлиги ва диаметри, қувур узунлиги бўйича қадамлар сони, вақт ва узунлик учун ҳисоб қадамлари, ҳарорат, қаршилиқ, ўта сиқилувчанлик коэффицентлар ва келтирилган газ доимийси берилди ҳамда газда кичик босим ва импульс кўзғалишларининг тарқалиш тезлиги қиймати ҳисоблаб чиқилади. Ундан кейин ечиладиган биринчи, иккинчи ёки учинчи масалага ўтилади. Муайян масала учун

керакли маълумотлар киритилиб, ҳисоблаш ишлари бажарилади. Натижалар график ва жадвал шаклларида тақдим этилади.

Бобнинг иккинчи параграфида учинчи бобнинг сонли натижаларини олиш учун ишлаб чиқилган дастурий восита (DGU № 11381)нинг таркиби, интерфейси ва имкониятлари ёритилган.

Ушбу дастур диаметри ва нивелир баландлиги йўл-йўлакай ўзгарувчи газ қувури қисмининг газодинамик ҳолати масаласини киришдаги газ босими ва чиқишдаги газ масса сарфининг вақтга боғлиқ ўзгариши берилган ҳоли учун мўлжалланган. Ечиш усули, ҳисоблаш алгоритми ва дастурий восита чегара шартларнинг бошқа вариантлари ва қувур диаметрининг турлича ўзгариши ҳоллари учун мослаштирилиши мумкин (8-расм).



8-расм. Газ қувурининг диаметри ва нивелир баландлиги йўл-йўлакай ўзгарувчи қисми учун яратилган дастурий воситанинг графиклар ойнаси

Ишлаб чиқилган ҳар иккала дастурий восита ҳам узилишли чегаравий шартлар ҳолида ишончли натижалар бериш имконига эга эканлигини намоиш этишди.

ХУЛОСА

«Реал газларни қувур орқали узатишда ўтиш жараёнларини математик моделлаштириш» мавзусидаги диссертация иши доирасида қуйидаги асосий натижалар олинди.

1. Қувур тармоқларининг хусусиятлари, тармоқлар ва уларнинг элементар қисмларини стационар ва ностационар ҳолларда ҳисоблашнинг асосий усуллари таҳлил этилди. Таҳлил асосида тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилди.

2. Газ қувири элементар қисмида босим градиенти фақат газ инерция кучининг локал ташкил этувчиси орқали ифодаланадиган қисқа қувири яқинлашувида ўзаро қарама-қарши югурувчи тўлқинлар киритиш усули ишлаб чиқилди. Бу усул қатор масалаларни характеристикалар усули билан ечиш имконини берди.

3. Киришда босим ва чиқишда масса сарфининг вақтга боғлиқ берилиши учун газ қувири элементар қисмининг газодинамик ҳолати масаласи характеристикалар усулида ечилди. Ечим биринчи вақт оралиғи $t \in [0, \tau]$ учун қурилди; бу ерда $\tau = l/c$, l – қисм узунлиги, c – босим кичик қўзғалишларининг газда тарқалиш тезлиги. Кейинги вақт оралиқларида босим ва масса сарфини аниқлаш учун рекуррент формулалар таклиф этилди.

4. Бошланғич ва чегаравий шартлардаги функцияларнинг ўзгармас қийматлари учун сонли тажриба ўтказилди. Ишлаётган қисмининг бир ёки икки охири оний беркитилганида газ босими, масса сарфи ва тезлигининг даврий ўзгариши рўй бериши кўрсатилди. Биринчи ҳолда давр 4τ га, иккинчи ҳолда 2τ га тенг бўлди.

5. Характеристикалар усулини қўллаш орқали кириш ва чиқишда масса сарфи вақтнинг функцияси бўлган ҳоллар учун масала ечилди. Бу функцияларнинг ўзгармас қийматларида ўтказилган сонли тажриба натижалари асосида масса сарфининг $t = \tau$ дан кейин даврий ўзгариши, босимнинг ўсувчи, камаювчи ва даврий ўзгарувчи режимлари ташкил топиши ва тезликнинг сўнувчи режими исботланди.

6. Газнинг қисм охиридан ташқарига оқиб чиқиши Н.Е. Жуковский формуласи билан тавсифланган, яъни чегаравий шартда барча изланувчи функциялар қатнашган, ҳол учун газ қувири элементар қисми масаласи илк марта шакллантирилди ва характеристикалар усулида ечилди. Сонли тажриба асосида бундай шартдан фойдаланиш ишончли лимит ечимини бериши, қисмдаги босимнинг уланган муҳит босимига интилиши исботланди.

7. Газ қувири кўндаланг кесими юзаси ва ўқи нивелир баландлигининг йўл-йўлакай ўзгаришида элементар қисм ҳолатига доир изотермик масала барча куч омилларини ҳисобга олган ҳолда киришдаги босим ва чиқишдаги масса сарфининг вақтга боғлиқ ўзгаришлари учун шакллантирилди. Ёрдамчи функция $\varphi = \ln \frac{f\rho}{f_*\rho_*}$ дан фойдаланиш ва масса сарфини киритиш орқали чизиқсиз ўнг қисмларга эга югурувчи тўлқинларнинг чизиқсиз гиперболик тенгламалари қурилди.

8. Югурувчи тўлқинларнинг чизиқсиз тенгламаларини ечиш учун тўлқин кўчиши йўналишини ҳисобга олувчи чекли айирмалар ва итерация асосида сонли усул, алгоритм ва ҳисоблаш дастури ишлаб чиқилди. Чизиқсиз чегаравий шарт Ньютоннинг уринмалар усули ёрдамида қаноатлантирилди.

9. Сонли тажриба натижалари асосида қувири кўндаланг кесимининг маҳаллий кенгайиши импульс сакрашларини сўндириши, меъёрий иш режимида босим чизиқлари уч бўғинли тузилишга эга бўлиши аниқланди.

10. Диссертация ишининг натижалари газ қузури элементларини танлаш ва унда кутиладиган босим сакрашларини аниқ ҳисоблаш учун фойдаланилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2021.Т.142.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАЗВИТИЯ ЦИФ-
РОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

АМИНОВ ХАЁТЖОН ХАЛИМЖОНОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРУБОПРОВОДНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ
РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

Ташкент – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2019.2.PhD/T1118.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта.

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

Научный руководитель:	Хужаев Исматулла Кушаевич доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Джуманов Жамолжон Худойкулович доктор технических наук, профессор Палванов Бозорбой Юсупович доктор философии технических наук (PhD)
Ведущая организация:	Национальный исследовательский университет «Тошкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»

Защита диссертации состоится «22» июля 2022 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.13/30.12.2021.T.142.01 при Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. (Адрес: 100125, г. Ташкент, М.Улугбекский р-н, Буз-2, дом 17А. Тел.: (99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (регистрационный номер № 11). (Адрес: 100125, г. Ташкент, М.Улугбекский р-н, Буз-2, дом 17А. Тел.: (99871) 263-41-98).

Автореферат диссертации разослан « » _____ 2022 года.
(протокол рассылки № 12 от «13» июня 2022 г.).



С.С.Н.

Н.С. Маматов
Председатель научного совета
по присуждению учёных степеней,
доктор технических наук, Профессор

А.М.Н.

Ф.М. Нуралиев
Ученый секретарь научного совета
по присуждению учёных степеней,
доктор технических наук, Доцент

Б.

Н.Равшнов
Председатель научного семинара при научном совете
по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, Профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире широко применяются трубопроводные системы, предназначенные для транспортировки текучих сред, передачи механической и тепловой энергии. Возможность функционирования этих систем в непрерывном режиме, преимущества с точек зрения экологии и экономии способствовали постепенному усовершенствованию их согласно требованиям времени. Функционирование систем трубопроводов в реальном времени описывается гидро- и газодинамическими показателями транспортируемой среды, изменениями загруженности трубопровода по времени и пространству. Резкие изменения давления и импульса приводят к существенным изменениям показателей в некоторых элементарных линейных участках и сети, а также выходу из строя силовых установок – компрессоров и насосов. В связи с этим актуально изучение динамических задач массового расхода, давления и скорости сред в трубопроводах и сетях трубопроводов.

В научных центрах и университетах многочисленных газодобывающих и газопользующих странах мира таких как США, Канада, Российская федерация, Норвегия, Германия, Казахстан, Узбекистан ведутся широкомасштабные исследования по транспортировке газа по трубопроводу и основное внимание при этом обращают обеспечению надежности и ресурсосбережения в существующих и вновь возводимых сетях трубопроводов. Формировалась тенденция постоянного мониторинга сетей и автоматического их управления, которая требует применения успехов математического моделирования и возможностей информационно-коммуникационных технологий.

В энергетическом балансе Республики Узбекистан природный газ занимает весомую долю. Узбекистан входит в состав первых двадцати стран по объему добычи газа. За последние пять лет начали функционировать Устюртский газохимический комплекс, Кандымский газоперерабатывающий комплекс и ряд других стратегических объектов. Имеются большой запас природного газа и сети газопроводов в месторождениях, а также разветвленная сеть магистральных газопроводов, способные обеспечить внутренних потребителей и экспорта газа. Ведутся исследования фундаментального и прикладного характера по внедрению методов математического моделирования и информационно-коммуникационных технологий в систему транспортировки газа, чтобы непрерывно доставить товарный газ потребителю в необходимом объеме. В Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах отмечены задачи «...внедрения современных международных стандартов и методов корпоративного управления, ... внедрение информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, системы управления...»¹, которые также относятся к отраслям нефти и газа.

¹ Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

В решении этих задач особое значение имеет разработка математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных средств для систем транспортировки газа в реальном времени функционирования.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Указами Президента Республики Узбекистан №УП-6010 от 18 июня 2020 года «О дополнительных мерах по совершенствованию механизма реализации природного газа и электрической энергии», №УП-4664 от 4 апреля 2020 года «О первоочередных мерах по повышению финансовой устойчивости нефтегазовой отрасли», №УП-4929 от 18 декабря 2020 года «О мерах по дальнейшему развитию инженерно-коммуникационной инфраструктуры в регионах» и другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной сфере.

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

Степень изученности проблемы. При расчете процессов трубопроводной транспортировки различных смесей, передачи механической и тепловой энергии используются формулы, полученные из квазиодномерных уравнений. Построенные путем осреднения членов полных уравнений Навье-Стокса по поперечному сечению трубопровода уравнения сохраняют особенностей гидродинамической нелинейности. Научные исследования по направлению построения этих уравнений и применения их к решению задач практики проводились рядом таких ученых, как Жуковский Н.Е., Миркин А.З., Чарный И.А., Усиньш В.В., Попов Д.Н., Сеннова Е.Б., Сидлер В.Г., Меренков А.П., Хасилев В.Я., Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.М., Селезнев В.Е., Алешин В.В., Штеренлихт Д.В., Грачев В.В., Novitsky N.N., Alekseev A.V., Grebneva O.A., Lutsenko A.V., Tokarev V.V., Huai Su, Enrico Zio, Jinjun Zhang, Xueyi Li, Lixun Chi, Lin Fan, Zongji Zhang и др. Разработанная Н.Е.Жуковским и впервые примененная для изучения ударной волны в водопроводных трубах квазиодномерная математическая модель продолжают усовершенствовать с учетом температуры и рельефа внешней среды, сложную структуру сети, гидродинамических и энергетических режимов течения, процессов конденсации и гидратации и других различных факторов.

Большая заслуга в изучении задач функционирования системы трубопроводов, распространения в них ударных волн и применении их в практику имеют Д.Ф.Файзуллаев, К.Ш.Латипов, В.К.Мукук, Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Р.Садуллаев, Ж.Акилов, Т.Юлдашев, О.В.Лебедев, Г.К.Аннакулова, Ф.Г.Темпель, И.К.Хужаев, О.Ш.Бозоров, М.Маматкулов, О.М.Арифжанов, С.И.Худойкулов, М.К.Махкамов, А.М.Фатхуллаев, У.У.Жонкобилев и другие ученые из Узбекистана.

На сегодняшний день разработаны различные способы решения стационарных и нестационарных задач сети трубопроводов с учетом многочисленных факторов. Но проблемы усовершенствования математической модели трубопровода с учетом переменного диаметра и уточняющих факторов, всестороннего анализа состояния среды в условиях распространения волн уплотнения и разряжения требуют проведения дополнительных исследований.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Научно-инновационного центра информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий в рамках проекта №БВ-М-Ф4-001 «Математические модели и эффективные распределенные вычислительные алгоритмы для решения многомерных задач сложного теплообмена» (2017-2020).

Целью исследования являются разработка и усовершенствование методов решения нелинейных задач, алгоритмов и программных обеспечений переходных процессов на элементарных участках газопроводов.

Задачи исследования:

провести анализ научных основ и методов изучения процессов трубопроводной транспортировки веществ, тепловой и механической энергии;

построение решений задач о коротком участке газопровода при заданных граничных значениях давления и массового расхода газа по методу характеристик и разработка программного обеспечения для вычислений;

сформулировать и решить задачу о состоянии элементарного участка газопровода с привлечением гипотезы Н.Е.Жуковского об ограниченности скорости истечения газа в бесконечное пространство и провести численный эксперимент;

разработать нелинейную математическую модель, численный алгоритм и программное средство для газопроводов с путевым изменением рельефа и поперечного сечения и с их помощью провести вычислительный эксперимент по распространению встречных волн.

Объектом исследования являются функционирование газопроводов и процессы распространения в них волн.

Предметом исследования являются изменения газодинамических показателей в газопроводах в нестационарных процессах.

Методы исследования. В ходе исследования применялись методы математического моделирования, метод характеристик и численные методы математической физики и методы инфокоммуникационных технологий по визуализации численных результатов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

с помощью методов линеаризации и характеристик разработан алгоритм решения нелинейных задач о газодинамическом состоянии короткого газо-

провода, в частности для граничных условий с одновременным участием искомых функций;

на основе решений, полученных методом характеристик, выявлен ряд особенностей состояния короткого газопровода, в частности, образование различных вариантов периодического состояния при скачкообразном изменении входного давления и выходного массового расхода; возрастающий, убывающий и периодический характер изменения давления при изменении массового расхода на границах; наличие предельного перехода при реализации формулы Н.Е. Жуковского в качестве граничного условия в конце участка газопровода;

путем введения вспомогательной функции разработан способ приведения уравнений транспортировки газа по газопроводу с путевыми изменениями диаметра и нивелирной высоты к уравнениям встречных бегущих волн;

с привлечением разработанных метода расчета, алгоритма и программного средства для решения нелинейных уравнений встречных волн предложен эффективный способ гашения скачков импульса с помощью местного расширения поперечного сечения трубопровода.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

создано условие для определения интервала изменения давления в нестационарных процессах, протекающих в коротких трубопроводах;

предложен способ учета переменной рельефа и площади поперечного сечения в гидравлических расчетах;

показана возможность подавления скачков импульса локальным увеличением площади поперечного сечения трубопровода.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования обосновывается строгим выполнением законов сохранения массы и импульса в уравнениях и условиях, использованием признанного классического метода при получении аналитических решений, обеспечением необходимой точности, устойчивости и сходимости вычислительного процесса, согласованием полученных результатов природой рассматриваемых процессов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования выражается тем, что разработана численная методика расчета газопроводов с переменными рельефом и площадью поперечного сечения в условиях обычной работы и распространения скачка импульса.

Практическая значимость результатов исследования объясняется возможностью использования полученных результатов при научном прогнозировании скачков давления в сети трубопроводов, увеличением надежности системы, при необходимости, путем гашения скачков импульса и разработкой программных средств, направленных для решения таких задач.

Внедрение результатов исследования. Результаты диссертационной работы на тему «Математическое моделирование переходных процессов при

трубопроводной транспортировке реальных газов» использованы в следующих предприятиях:

численный метод и программные средства, разработанные для решения системы нелинейных уравнений встречных бегущих волн, внедрены в филиале газоснабжения «Худудгаз Фаргона» (справка Министерство по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан № 33-8/7765 от 3 ноября 2021 г., справка АО Узбекнефтегаз 03-17-5/7765 от 8 ноября 2021 г.). В результате время расчета для выбора диаметров трубопровода и переходников к другому диаметру газопровода с учетом распространения ударной волны сокращено на 12-16%, точность расчета увеличена на 10-12% и обеспечено непрерывное функционирование установки;

разработанный для решения системы нелинейных уравнений встречных бегущих волн численный метод внедрен в ООО «Universal elegant lyuks» (справка Министерство по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан № 33-8/7765 от 3 ноября 2021 г.). В результате время точного расчета скачков давления в системе трубопроводов организации сокращено на 15-20%, точность расчета увеличена на 12% и обеспечено непрерывное функционирование установки;

вычислительный алгоритм, разработанный с помощью методов линеаризации и характеристик для решения нелинейных задач о нестационарном газодинамическом состоянии короткого газопровода с различными граничными условиями, в том числе с участием всех неизвестных, применен в ООО «Водий Шамс Электрон Мантаж» (справка Министерство по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан № 33-8/7765 от 3 ноября 2021 г.). В результате оптимального выбора диаметра трубопровода и элементов перехода к другому диаметру при транспортировке газа по трубопроводу с учетом распространения ударных волн энергозатрата установки уменьшилась на 10%, а надежность установки возросла на 20 %.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 2 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 22 научных работ, в том числе, 4 журнальных статей, 5 в республиканских и 3 в иностранных научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. Получены 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 112 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в практику, сведения об опубликованных работах и о структуре диссертации.

В первой главе описаны «**Основные составляющие и особенности сети газопроводов и их расчета**». Она состоит из четырех параграфов.

§1.1 обсуждены сети трубопроводов и их особенности.

Трубопроводные системы представляют собой сооружения для транспортировки жидких, газообразных, газожидкостных и содержащих твердых частиц продуктов от начального пункта – источника до конечного пункта – потребителя. Они транспортируют целевого продукта – нефти, нефтепродуктов, газа, воды, ..., тепла и механической энергии и работают в вакуумном ($p < 0.1 \text{ МПа}$), безнапорном ($p = 0.1 \text{ МПа}$) режимах, а также в режимах низкого ($0.1 \text{ МПа} < p < 1.6 \text{ МПа}$), среднего ($1.6 \text{ МПа} \leq p \leq 10 \text{ МПа}$) и высокого ($p > 10 \text{ МПа}$) давления. Температура транспортируемой среды может быть низкой ($< -40^\circ\text{C}$), средней ($-40^\circ\text{C}..450^\circ\text{C}$) и высокой ($> 450^\circ\text{C}$). Сети трубопроводов обеспечиваются арматурой – регулирующими устройствами. В этом параграфе обсуждена структура сети газопроводов, состоящей из линейных и точечных элементов, начиная от коллекторов сбора газа на месторождениях, до распределения его потребителям.

В §1.2 описана квазиодномерная математическая модель процесса транспортировки газов и жидкостей по трубопроводу, разработанная впервые Н.Е. Жуковским путем осреднения полных уравнений Навье-Стокса по поперечному сечению. Его уравнения до сих пор применяются при изучении процесса транспортировки сред с определенными исправлениями и дополнениями. Представление этой системы уравнений для газопроводов с переменной поперечной площадью $f(x) = \pi D^2(x) / 4$ следующее:

$$\begin{cases} \frac{\partial(f\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(f\rho w)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial(\rho w f)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w^2 f)}{\partial x} = -f \left(\frac{\partial p}{\partial x} + g\rho \frac{dy}{dx} \right) - \frac{\pi}{8} \lambda \rho w |w| D, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho f \left(\varepsilon + \frac{w^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho w f \left(\varepsilon + \frac{w^2}{2} \right) \right] = - \frac{\partial(\rho w f)}{\partial x} - \\ - \rho g f w \frac{\partial y}{\partial x} - p \frac{df}{dt} + Qf + \frac{\partial}{\partial x} \left(kf \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \Phi(T, T_a). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $p(x,t)$, $\rho(x,t)$, $w(x,t)$, $T(x,t)$ – средние значения давления, плотности, скорости и температуры газа в сечении x в момент времени t ;

$y = y(x)$ – нивелирная высота оси трубопровода; g – ускорение силы гравитации; λ – коэффициент сопротивления трения; $\varepsilon = c_v T$, $w^2 / 2$ – удельная внутренняя и кинетическая энергия газа; c_v – удельная изохорическая теплоемкость вещества; Q – удельная интенсивность внутренних источников энергии; k – коэффициент теплопроводности газа; $-\Phi(T, T_a)$ – теплотдача окружающей среде, температура которой равна T_a .

Система (1) замыкается уравнением состояния реального газа

$$p = Z\rho R_0 T, \quad (2)$$

где Z – коэффициент сжимаемости (сверхсжимаемости) газа; $R = R_0 / \mu$; $R_0 = 8.3143$ Дж/(кмоль · К) – приведенная и универсальная газовые постоянные; μ – молярная масса газа.

Для каждой задачи формулируются начальные и граничные условия, которые обеспечивают однозначность решения нелинейных уравнений (1) и (2), и система упрощается в зависимости от требуемой точности расчета.

В инженерной практике (§1.3) пользуются формулами, которые получены из системы уравнений (1) и (2) в стационарном режиме течения при достаточном удалении от источников возмущений. В частности, для горизонтального участка газопровода при входном давлении p_0 распределение давления по длине участка определяется по формуле

$$p(x) = \sqrt{p_0^2 - \frac{\lambda Z R}{D f^2} M^2 x}, \text{ где } M = f \rho w - \text{массовый расход газа.}$$

Обсуждены варианты учета переменности температуры и уклона трассы при гидравлическом расчете элементарного участка и сети газопроводов по материалам таких ученых, как Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.М., Коротаев Ю.П., Ширковский А.И., Файзуллаев Д.Ф., Igwilo K., Okoro E., Nwude A., Mamudu A., Onuh C., Abbasov E., Agayeva G., Agayeva N., Kengerli T., Atena A., Tekalign W., Muche T., Акбасов А.Р., Меренков А.П., Хасилев В.Я., Сеннова Е.В., Сидлер В.Г., Садуллаев Р., Хужаев И.К. и др.

В §1.4 обсуждены способы расчета элементарного участка и сети газопроводов в нестационарном режиме функционирования. На основе литературных источников перечислены методы решения уравнений (1) и (2), а также и их упрощенных вариантов. Обсуждаются возможные варианты учета различных внутренних (конденсация, гидратация, эффект Джоуля-Томсона) и внешних (температуры, транспортные системы, рельеф трассы и др.) факторов.

На основе анализа литературных источников и насущных проблем газовой отрасли сформулированы цель и задачи исследований.

Вторая глава диссертации посвящена **«Применению метода характеристик для решения задач об элементарном участке магистрального газопровода»** в рамках приближения короткого трубопровода. В ней получены и анализированы решения трех задач с разными граничными условиями при заданных начальных распределениях газодинамических показателей.

В §2.1 рассмотрена самая простая схема сети газопровода, состоящая из нагнетателя, трубопровода и потребителя. Нагнетатель обеспечивает входное давление $\psi_0^{(p)}(t)$, потребитель отбирает газ с интенсивностью $\psi_0^{(M)}(t)$ по массе. Показатели горизонтального участка газопровода подчиняются закону сохранения импульса в коротком газопроводе

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial t} = 0$$

и закону сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho w}{\partial x} = 0$$

при известных начальных распределениях давления $p_0(x)$ и скорости газа $w_0(x)$. Состояние газа подчиняется закону реального газа $p(x,t) = c^2 \rho(x,t)$, где скорость распространения малых возмущений принята в виде $c = \sqrt{ZRT}$.

С введением массового расхода $M = f \rho w$ и переходом к аналогам бегущих волн

$$u(x,t) = p(x,t) + \frac{c}{f} M(x,t), \quad v(x,t) = p(x,t) - \frac{c}{f} M(x,t)$$

составлена система линейных гиперболических уравнений

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} - c \frac{\partial v}{\partial x} = 0.$$

Для вновь введенных искомым функций сформулированы начальные

$$u(x,0) = p_0(x) + \frac{c}{f} M_0(x) = \varphi_0^{(u)}(x), \quad v(x,0) = p_0(x) - \frac{c}{f} M_0(x) = \varphi_0^{(v)}(x)$$

и граничные условия

$$u(0,t) + v(0,t) = 2\psi_0^{(p)}(t), \quad u(l,t) - v(l,t) = \frac{2c}{f} \psi_0^{(M)}(t).$$

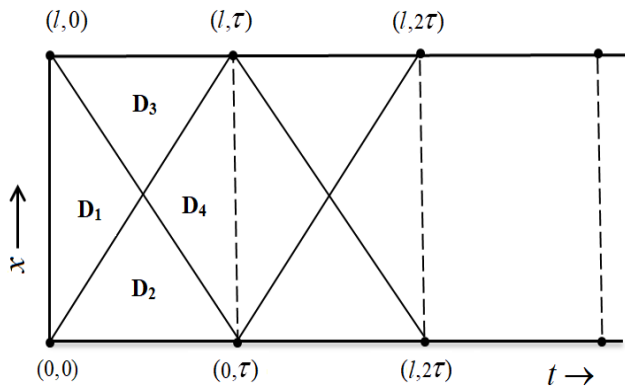


Рис. 1. Разделение области расчета на временные полосы и подобласти

Область решения $D = \{(x,t) : 0 < x < l, 0 < t < T\}$ разделена на полосы времени с постоянным шагом $\tau = l/c$ и в каждой полосе выделены подобласти D_1, D_2, D_3 и D_4 (рис. 1).

С учетом сохранения граничных и начальных условий по характеристикам $x = \pm ct + const$ определены значения вновь введенных функций в первой временной полосе $t \in (0, \tau]$:

$$\text{в подобласти } D_1 \cup D_2 - v(x,t) = \varphi_0^{(v)}(x + ct);$$

$$\text{в подобласти } D_1 \cup D_3 - u(x,t) = u(x - ct, 0) = \varphi_0^{(u)}(x - ct);$$

в подобласти $D_2 \cup D_4 - u(x,t) = 2\psi_0^{(p)}\left(t - \frac{x}{c}\right) - \varphi_0^{(v)}(ct - x)$;

в подобласти $D_3 \cup D_4 - v(x,t) = \varphi_0^{(u)}(2l - x - ct) - \frac{2c}{f}\psi_0^{(M)}\left(t - \frac{l-x}{c}\right)$.

Согласно этим зависимостям построены решения задачи

$$p(x,t) = \frac{1}{2}[u(x,t) + v(x,t)], \quad M(x,t) = \frac{f}{2c}[u(x,t) - v(x,t)], \quad w(x,t) = \frac{c^2}{f} \frac{M(x,t)}{p(x,t)}$$

для первой временной полосы $t \in (0, \tau]$.

Решение задачи, полученное для конца определенной временной полосы, можно использовать как начальное условие для следующей временной полосы. По этому принципу построен алгоритм решения задачи для последующих временных полос.

В частном случае, который реализован в виде программного продукта, построены решения для постоянных значений функций в краевых условиях: $p_0(x) = p_0, M_0(x) = M_0, \psi_0^{(p)}(t) = \psi^{(p)}, \psi_0^{(M)}(t) = \psi^{(M)}$ в виде рекуррентных формул:

$$\text{в } D_1: p_n(x,t) = p_{n-1}, M_n(x,t) = M_{n-1};$$

$$\text{в } D_2: p_n(x,t) = \psi^{(p)}, M_n(x,t) = M_{n-1} + \frac{f}{c}(\psi^{(p)} - p_{n-1});$$

$$\text{в } D_3: p_n(x,t) = p_{n-1} + \frac{c}{f}(M_{n-1} - \psi^{(M)}), M_n(x,t) = \psi^{(M)};$$

$$\text{в } D_4: p_n(x,t) = \psi^{(p)} + \frac{c}{f}(M_{n-1} - \psi^{(M)}), M_n(x,t) = \psi^{(M)} + \frac{f}{c}(\psi^{(p)} - p_{n-1}).$$

Примерные результаты в виде графиков представлены на рис. 2.

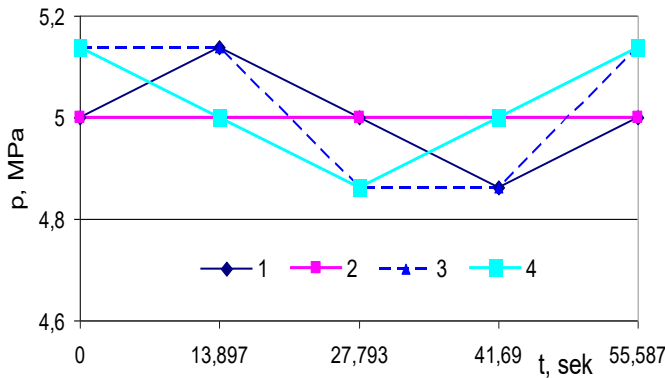


Рис. 2. Изменения дискретных значений давления в подобластях D_1 (кривая 1), D_2 (2), D_3 (3) и D_4 (4) в течение времени, равное четырем масштабам времени τ .

$$c = 359.80 \text{ м / с}, \quad D = 1.0 \text{ м},$$

$$l = 5000 \text{ м}, \quad p_0 = \psi^{(p)} = 5 \text{ МПа},$$

$$M_0 = 300 \text{ кг / с}, \quad \psi^{(M)} = 0 \text{ кг / с}$$

Анализ результатов расчета показал, что решение имеет период 4τ . Т.е. возмущения имеют негасящийся характер. Если скачкообразное изменение показателя происходит в одном из концов участка, то только в одной подобласти значения показателей меняются в каждом временном отрезке τ (кривая 3 рис. 2), иначе показатели всех подобластей терпят изменения при переходе к новой временной полосе.

В §2.2 аналогичным образом решена задача при задании изменения массового расхода газа по времени в концах участка.

Проведенный вычислительный эксперимент показал, что после $t = \tau$ изменение массового расхода газа имеет периодический характер с периодом 2τ при изменении массового расхода в одном конце участка и с периодом τ – при изменении массового расхода газа в двух концах участка. При большем значении входного расхода газа чем в конце участка давление газа на участке постепенно возрастает (рис. 3) и наоборот. При одинаковых новых значениях входного и выходного расхода газа проявляется периодический характер изменения давления. Показано, что во всех этих переходных случаях скорость газа с истечением времени стремится к нулю.

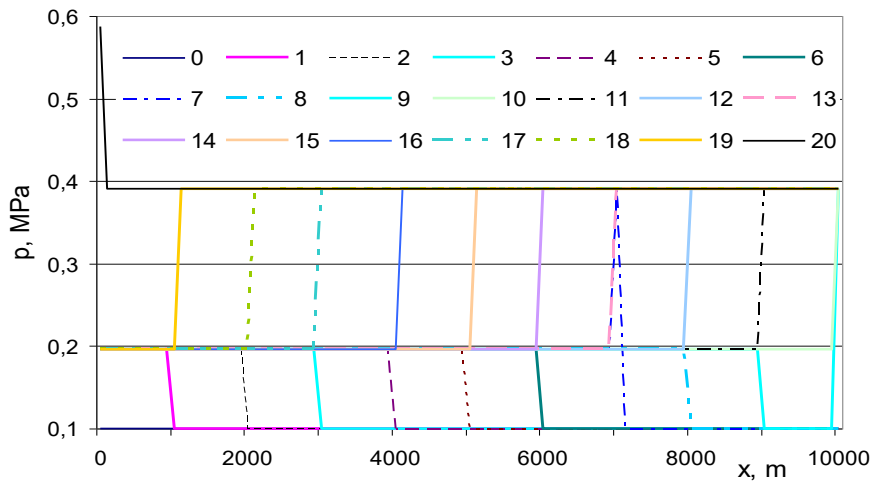


Рис. 3. Изменение давления газа в промежутке времени $0 \leq t \leq 2l/c$ при большем значении входного расхода газа. $p_0 = 0.1$ МПа, $\psi_0^{(0)} = 200$ кг/с, $M_0 = \psi_0^{(l)} = 0$ кг/с, $l = 10$ км, $D = 1.0$ м, $c = 379.93$ м/с

В §2.3 решена задача, когда на входе в участок задан закон изменения массового расхода газа, а на выходе использована формула Н.Е. Жуковского об ограниченной скорости истечения газа в открытое пространство через штуцер. В рассматриваемом случае формула имеет вид:

$$p(l,t) - \psi_l(t) = \alpha f \rho(l,t) w(l,t),$$

где $\psi_l(t)$ – значение давления в сообщающемся трубопроводе объеме; $\alpha = c/s$; s, f – площади поперечных сечений штуцера и трубопровода.

Это граничное условие – нелинейное и содержит значений всех трех неизвестных на границе. Тем не менее, с применением соответствующих видоизменений оно линеаризовано, и задача решена методом характеристик. Численные результаты задачи относились к случаям постоянных значений функций, фигурирующих в начальных и граничных условиях. На рис. 4 отражена динамика давления в подобласти D_1 при истечении газа из участка.

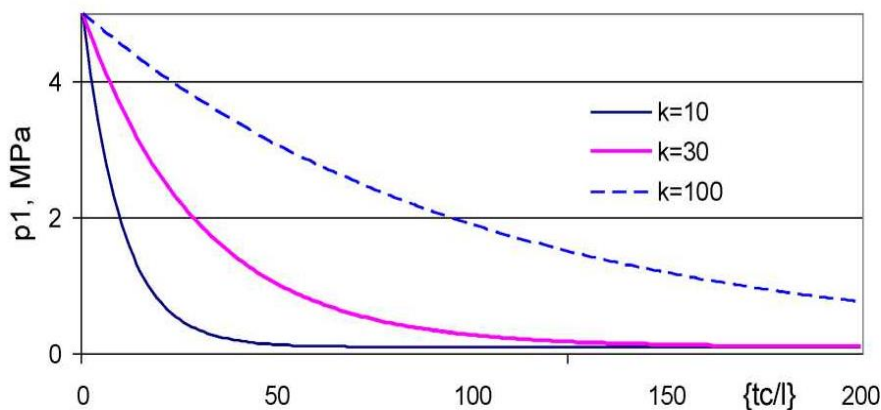


Рис. 4. Временные изменения давления в подобласти D_1 для трех значений. $k = f/s$, $D = 1$ м, $p_0 = p_e = 5.0$ МПа,

$$p_a = 0.1 \text{ МПа}, l = 5000 \text{ м}, c = 359.80 \text{ м/с}$$

В отличие от решений предыдущего параграфа, где показаны варианты решения $p(x,t) \rightarrow \pm\infty$ при $t \rightarrow \infty$, в данном случае давление газа на участке экспоненциальным законом стремится к значению давления окружающей среды. Это соответствует природе рассматриваемого объекта.

Третья глава «Математическая модель, метод и алгоритм расчета законов сохранения субстанций и распространения фронта импульса в трубопроводах с переменным диаметром» диссертации посвящена разработке численного алгоритма решения задач трубопроводного транспорта газа в рельефном трубопроводе с переменной площадью поперечного сечения в изотермическом случае.

При моделировании процесса учтены все силовые факторы:

$$-f \frac{\partial p}{\partial x} = f \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\lambda f}{2D} \rho w |w| + f \rho g \sin \alpha + f \rho w \frac{\partial w}{\partial x}, \quad -f \frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho f w)}{\partial x}, \quad p = c^2 \rho.$$

Рассматривали два варианта начальных условий в соответствии состоянию покоя газа ($w(x,0) = 0$ м/с) с барометрическим распределением давления и состоянию постоянного массового расхода газа ($M(x,0) = M_0(x) = \text{const}$). Во втором случае начальные распределения скорости и давления определяли численным способом. На входе в участок задавали закон изменения давления по времени ($p(0,t) = p_0(t)$), а на выходе – изменения массового расхода газа по времени ($M(l,t) = M_l(t)$).

С привлечением масштабов длины l , скорости c и времени l/c уравнения и условия представлены в безразмерном виде. С введением новой переменной $\varphi = \ln \frac{f \rho}{f_* \rho_*}$ ($f_* \rho_*$ – характерные значения площади поперечного сечения трубопровода и плотности газа) система уравнений приведена к виду

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}} = 2 \frac{\partial \ln(D/D_*)}{\partial \bar{x}} - \frac{gl}{c^2} \sin \alpha - \frac{\lambda l}{2D} \bar{u} |\bar{u}|, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} = 0.$$

Из основной матрицы $A = \begin{vmatrix} \bar{u} & 1 \\ 1 & \bar{u} \end{vmatrix}$ этой системы гиперболических уравнений составлены диагональная матрица $\Lambda = \begin{vmatrix} \bar{u}+1 & 0 \\ 0 & \bar{u}-1 \end{vmatrix}$, которая состоит из собственных чисел матрицы A , и фундаментальная матрица $V = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}$, состоящая из собственных векторов матрицы A .

С привлечением этих матриц составлена система уравнений

$$\frac{\partial f_1}{\partial \bar{t}} + (1 + \bar{u}) \frac{\partial f_1}{\partial \bar{x}} = F, \quad \frac{\partial f_2}{\partial \bar{t}} - (1 - \bar{u}) \frac{\partial f_2}{\partial \bar{x}} = F,$$

где $f_1(\bar{x}, \bar{t}) = \bar{u}(\bar{x}, \bar{t}) + \bar{\varphi}(\bar{x}, \bar{t})$, $f_2(\bar{x}, \bar{t}) = \bar{u}(\bar{x}, \bar{t}) - \bar{\varphi}(\bar{x}, \bar{t})$ – встречные волны;

$$F = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\ln \frac{D}{D_*} \right) - \frac{gl}{c^2} \sin \alpha - \frac{\lambda l}{2D} \bar{u} |\bar{u}|.$$

В соответствии с этими видоизменениями вновь сформулированы условия задачи. Введены дискретные координаты $i = x/h$ и $n = t/\tau$ с постоянными шагами h по длине и τ по времени.

В работе приведены решения стационарных задач для путевого изменения высоты оси и площади поперечного сечения газопровода при различных условиях, в частности для криволинейной трассы, которые служили начальными условиями для нестационарных задач.

В силу нелинейности уравнений в каждом n -м шаге времени организовали итерационный процесс. Значения $f_{li}^{n,s+1}$ вычисляли, полагая известными значения f_{2i}^n , с учетом направления перемещения слева направо, а значения $f_{2i}^{n+1,s+1}$ – справа налево, используя известных значений $f_{li}^{n+1,s+1}$.

Значения f_{li}^{n+1} вычисляли по формулам: $f_{10}^{n+1,s} = \bar{u}_0^{n+1,s} + \varphi_0^{n+1,s}$ при $i=0$ и

$$f_{li}^{n+1,s} = \frac{f_{li}^n + \sigma(1 + \tilde{u}_i^n) f_{li-1}^{n+1,s} + \tau \Phi_{li}^n}{1 + \sigma(1 + u_i^n)}$$

при $i = N-1 \dots 0$ (здесь $\sigma = \tau/h$).

На выходе из участка условие приобретает вид трансцендентного уравнения $e^{\varphi(1,\bar{t})} \bar{u}(1,\bar{t}) = \bar{Q}_l(\bar{t})$, где $\bar{Q}_l(\bar{t})$ – приведенная интенсивность отбора газа. Для решения его при $\bar{Q}_l(\bar{t}) \neq 0$ использовали метод касательных Ньютона для $\bar{u}_N^{n+1,s} = \bar{u}$. Итерационный процесс, до выполнения условия $|\bar{u}^{k+1} - \bar{u}^k| < 10^{-8}$,

производили по формуле $\bar{u}^{k+1} = \bar{u}^k + \frac{e^{-f_{1N}^{n+1,s}} \bar{Q}_l^{n+1} - \bar{u}^k}{1 - \bar{u}^k}$. При $\bar{Q}_l(\bar{t}) = 0$ принимали $\bar{u}_N^{n+1,s} = 0$. По найденному значению $\bar{u}_N^{n+1,s}$ вычисляли $\varphi_N^{n+1,s}$ и $f_{2N}^{n+1,s}$.

Для узлов $i = N-1 \dots 0$ использовали формулу

$$f_{2i}^{n+1,s} = \frac{f_{2i}^{n+1,s} + \sigma(1 - \tilde{u}_i^n) f_{2i+1}^{n+1,s} + \tau \Phi_{2i}^n}{1 + \sigma(1 - \tilde{u}_i^n)}.$$

В зависимости от максимальных абсолютных значений разностей значений f_{li} и f_{2i} последних двух итераций продолжили (или прекратили) итерационный процесс.

Составлена программа расчета для локального синусоидального изменения диаметра газопровода

$$D(x) = \begin{cases} D_1 \text{ при } \frac{x}{l} < 0.3 \cup \frac{x}{l} > 0.7, \\ D_1 + \beta D_1 \sin \left[\frac{\pi}{0.4} \left(\frac{x}{l} - 0.5 \right) \right] \text{ при } 0.3 \leq \frac{x}{l} \leq 0.7. \end{cases}$$

Расчеты проводили для нулевого, различных положительных и отрицательных значений параметра β при $l=10$ км, $D=1.0$ м, $\lambda=0.028$, $T=300$ К,

$\rho_* = 0.699 \text{ кг/м}^3$, $c=378,2 \text{ м/с}$, $z=0.92$. В частности, результаты по давлению, массовому расходу и скорости газа при $\beta = 0$ (постоянного диаметра) совпадали с результатами И.К. Хужаева и Х.А. Мамадалиева.

Серия расчетов проведена для начального условия $w(x,0) = 0 \text{ м/с}$. Результаты расчета при $\beta = 0.5$, $p(x,0) = p(0,t) = 5.6 \text{ МПа}$, $M(l,t) = 250 \text{ кг/с}$ показали, что до достижения зоны расширения результаты по массовому расходу газа повторяли результатов, полученных при $\beta = 0$ с образованием фронта скачка массового расхода (рис. 5). В расширенной зоне массовый расход газа близок своему новому значению.

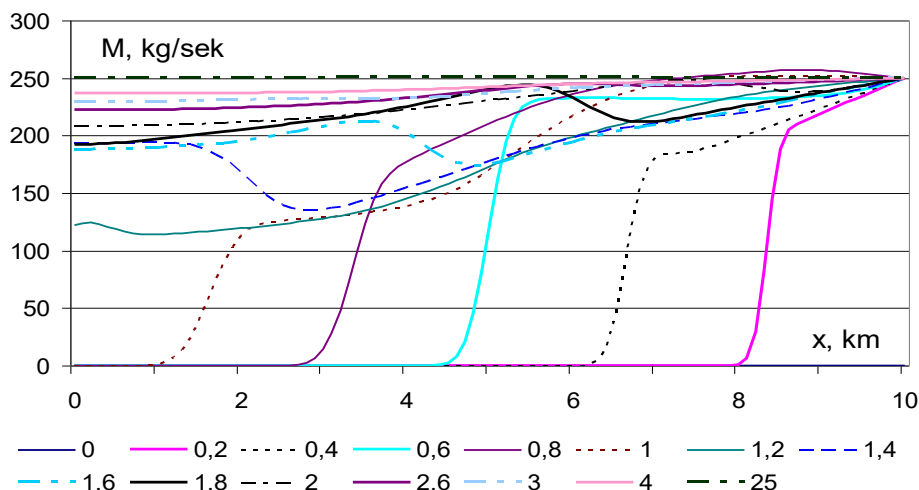


Рис. 5. Динамика массового расхода для синусоидального расширения диаметра при $\beta = 0.5$, $p(x,0) = p(0,t) = 5.6 \text{ МПа}$, $M(l,t) = 250 \text{ кг/с}$.

Во всех случаях $\beta \neq 0$ получены трехзвенные кривые давления. На рис. 6 представлена типичная динамика распределения давления по длине участка при $\beta = -0.2$, когда с конца участка, на котором установилось давление $p(x,0) = 5.6 \text{ МПа}$, начался отбор газа с интенсивностью $M(l,t) = 250 \text{ кг/с}$.

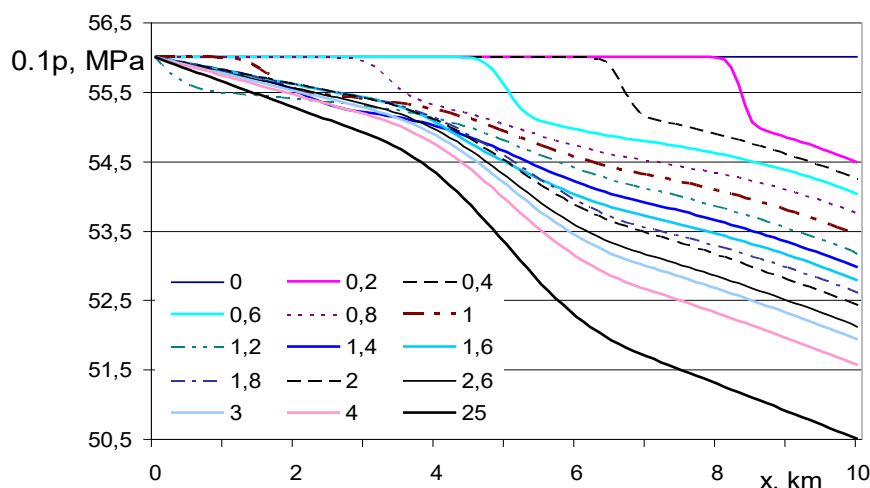


Рис. 6. Кривые давления при установлении потока на участке с сужением. $\beta = -0.2$ и $D_1 = 1 \text{ м}$

Другая серия расчетов проведена в целях изучения состояния действующего элементарного участка в процессе перехода к новому массовому расходу газа. И в этом случае также удалось проследить за распространением,

отражением и гашением скачка импульса в случаях локального расширения и сужения цилиндрического канала.

Все результаты главы получены для значений безразмерных шагах по длине $h=0.001$ и времени $\tau=0.0002$, при которых исключены осцилляции вокруг скачка импульса и выполнялись условия $\max_{0 \leq i \leq N} |f_{1i}^{n+1,1} - f_{1i}^{n+1,0}| < 0.001$, $\max_{0 \leq i \leq N} |f_{2i}^{n+1,1} - f_{2i}^{n+1,0}| < 0.001$. Выполнение условия $\max_{0 \leq i \leq N} |M_N / M_l(t) - 1| < 0.001$ в последних приближениях свидетельствует о достоверности результатов.

В четвертой главе диссертации, озаглавленной «**Программное обеспечение для исследования переходных процессов при трубопроводной передаче реальных газов**», представлены описания программ, разработанных для получения численных результатов приведенных в предыдущих главах.

Достоверность результатов, полученных во второй главе, была доказана удовлетворением условий Гюгонио – изотермического сохранения импульса, напора и энергии в процессах прохождения ударной волны и от решения волн на концах труб.

Численные результаты второй главы были получены с помощью программы расчета (DGU № 13916), составленной на основе трех приведенных выше решений. В §4.1 обсуждаются структура, интерфейс и возможности данного программного продукта.

УМУМИЙ МАЪЛУМОТЛАР

L = <input style="width: 60px;" type="text"/>	T = <input style="width: 60px;" type="text"/>
D = <input style="width: 60px;" type="text"/>	P ₀ = <input style="width: 60px;" type="text"/>
λ = <input style="width: 60px;" type="text"/>	M ₀ = <input style="width: 60px;" type="text"/>

Биринчи масала

Иккинчи масала

Учинчи масала

Рис. 7. Окно общей информации и перехода к отдельной задаче программы, разработанной на основе решений по методу характеристик

Во вводной части программы описаны скалярные и векторные величины. Векторные величины представляют начальных значений давления, массового расхода и скорости газа по длине трубы. В окне (рис. 7) вводятся общие данные для трех задач: длина и диаметр участка трубопровода, количество шагов по длине трубопровода, шаги по времени и длине, температура, коэффициент сопротивления, коэффициенты сжимаемости и приведенная газовая постоянная, вычисляется значение скорости распространения возмущений в газе. После этого осуществляется переход к конкретной задаче, для которой вводится необходимая информация, и выполняются вычисления. Результаты представляются в виде графиков и таблиц.

Во втором параграфе главы описаны структура, интерфейс и возможности программного продукта (DGU № 11381), разработанного для получения численных результатов третьей главы.

Программа предназначена для решения задачи о газодинамическом состоянии элементарного участка газопровода для случая изменения давления газа на входе и массового расхода газа на выходе по времени. Метод решения, алгоритм расчета и программа могут быть адаптированы к другим вариантам граничных условий и диаметра трубы.

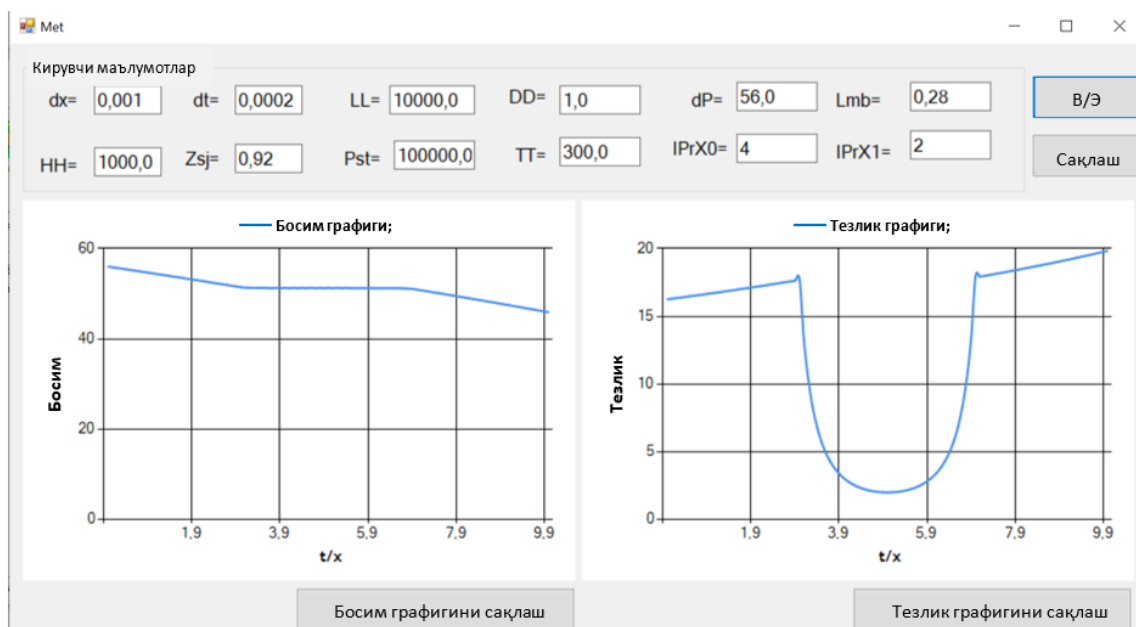


Рис. 8. Графическое окно программного средства, разработанной для расчета участка газопровода с путевым изменением диаметра и нивелирной высоты

Разработанные программные средства демонстрировали возможность получения достоверных результатов при разрывных граничных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационной работы на тему «Математическое моделирование переходных процессов при трубопроводной транспортировке реальных газов» получены следующие основные результаты.

1. Проведен анализ особенностей сети трубопроводов, основных способов расчета сети и её элементарных участков в стационарной и нестационарной постановках. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

2. В рамках подхода короткого трубопровода, когда градиент давления на элементарном участке газопровода определяется локальным составляющим силы инерции газа, разработан способ введения аналогов встречных бегущих волн. Это позволило получить решения ряда задач методом характеристик.

3. Методом характеристик решена задача о газодинамическом состоянии элементарного участка газопровода, когда входное давление и выходной массовый расход газа являются функциями от времени. Решение по-

строено для первого временного отрезка $t \in [0, \tau]$, где $\tau = l/c$, l – длина участка; c – скорость распространения малых возмущений давления в газе. Для последующих временных отрезков предложены рекуррентные формулы для определения давления и массового расхода газа.

4. Проведен вычислительный эксперимент при постоянных значениях функций в начальных и граничных условиях. Показано, что при мгновенном закрытии одного или двух концов функционирующего участка образуются периодические изменения давления, массового расхода и скорости газа на участке. В первом случае период изменений составляет 4τ , а во втором случае – 2τ .

5. С применением метода характеристик решена задача, когда входной и выходной массовые расходы являются функциями от времени. В результате проведенного вычислительного эксперимента при постоянных значениях этих функций в краевых условиях доказано: периодический характер изменения массового расхода газа после $t = \tau$, образование возрастающего, убывающего и периодических режимов изменения давления и гасящийся режим изменения скорости.

6. Впервые сформулирована и методом характеристик решена задача об элементарном участке газопровода, где истечение газа из конца участка в атмосферу описано формулой Н.Е. Жуковского, т.е. при одновременном участии искомых функций в граничном условии. Вычислительным экспериментом доказано, что использование такого граничного условия позволяет получить более адекватное решение задачи с предельным переходом к давлению, которое установлено в сообщаемом с элементарным участком бесконечном пространстве.

7. С учетом всех силовых факторов сформулирована изотермическая задача о состоянии элементарного участка газопровода с путевыми изменениями площади поперечного сечения и нивелирной высоты оси газопровода при заданных законах изменения входного давления и выходного массового расхода газа по времени. С применением вспомогательной функции $\varphi = \ln \frac{f\rho}{f_*\rho_*}$ и введением массового расхода газа построены нелинейные гиперболические уравнения бегущих волн с правыми нелинейными частями.

8. Для решения нелинейных уравнений бегущих волн разработаны численный метод, алгоритм и программа расчета на основе конечных разностей с учетом направления переноса бегущих волн и метода итерации. Нелинейное граничное условие удовлетворено методом касательных Ньютона.

9. На основе результатов вычислительного эксперимента выявлено, что при локальном расширении поперечного сечения трубопровода гасятся скачки импульса, а в обычном режиме работы кривые давления имеют трехзвенную структуру.

10. Результаты диссертационной работы использованы при выборе элементов газопровода и для точного вычисления ожидаемых скачков давления в газопроводе.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.13/30.12.2021.T.142.01 AT RESEARCH INSTITUTE FOR
DEVELOPMENT OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL
INTELLIGENCE**

**RESEARCH INSTITUTE FOR DEVELOPMENT OF DIGITAL
TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

AMINOV XAYOTJON XALIMJONOVICH

**MATHEMATICAL MODELING OF TRANSIENTS DURING PIPELINE
TRANSPORTATION OF REAL GASES**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and program complexes

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

Tashkent – 2022

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 B2019.2.PhD/T1118.

The dissertation has been prepared at the Research institute for development of digital technologies and artificial intelligence.

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

Scientific adviser: **Khujaev Ismatulla Kushaevich**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Official opponents: **Djumanov Jamoljon Xudoykulovich**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Palvanov Bozorboy Yusupovich
Doctor of Philosophy on Technical Sciences (PhD)

Leading organization: **«Tashkent Institute of Irrigation and Agricultura
Mechanization Engineers» National Research
University**

The defense will take place "22" July 2022 at 14⁰⁰ the meeting of Scientific council No. DSc.13/30.12.2021.T.142.01 at Research institute for development of digital technologies and artificial intelligence (Address: 100125, Tashkent city, M.Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of the Research institute for development of digital technologies and artificial intelligence (is registered under No. 11). (Address: 100125, Tashkent city, M.Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98).

Abstract of dissertation sent out on " " 2022 y.
(mailing report No. 12 on "13" June 2022 y.).



cop

N.S. Mamatov
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, Docent

N. Ravshanov
Chairman of the scientific seminar under
the scientific council awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

[Handwritten signatures]

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work is to develop and improve methods for solving nonlinear transient problems in elementary sections of gas pipelines.

The objects of the research work are the functioning of gas pipelines and the processes of propagation of waves in them.

The scientific novelty of the research work is as follows:

using the methods of linearization and characteristics, an algorithm for solving nonlinear problems about the gas-dynamic state of a short gas wire has been developed, in particular for boundary conditions with simultaneous participation of the original functions;

based on the solutions obtained by the characteristics method, a number of features of the state of a short gas pipeline have been identified, in particular, the formation of various variants of the periodic state with an abrupt change in the input pressure and output mass flow rate; the increasing, decreasing and periodic nature of the pressure change when the mass flow rate changes at the boundaries; the presence of a limit transition when implementing the formula N.E. Zhukovsky as a boundary condition at the end of the gas pipeline section;

by introducing an auxiliary function, a method has been developed for reducing the equations of gas transportation through a gas pipeline with track changes in diameter and leveling height to the equations of oncoming traveling waves;

with the involvement of the developed calculation method, algorithm and software for solving nonlinear equations of oncoming waves, an effective method of damping pulse surges using local expansion of the pipeline cross-section is proposed.

Implementation of obtained results. Implementation of the research results. The results of the dissertation work on the topic "Mathematical modeling of transients during pipeline transportation of real gases" were used:

the numerical method and software tools developed to solve the system of nonlinear equations of oncoming traveling waves have been implemented in the gas supply branch of Hududgaz Fargona (reference of the Ministry for the Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan No. 33-8/7765 dated November 3, 2021, reference of Uzbekneftegaz 03-17-5/7765 dated November 8, 2021). As a result, the calculation time for selecting the diameters of the pipeline and adapters to another diameter of the gas pipeline, taking into account the propagation of the shock wave, was reduced by 12-16%, the calculation accuracy was increased by 10-12% and the continuous operation of the installation was ensured;

The numerical method developed to solve the system of nonlinear equations of oncoming traveling waves has been implemented in Universal elegant lyuks LLC (reference of the Ministry for the Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan No. 33-8/7765 dated November 3, 2021). As a result, the time for accurate calculation of pressure surges in the organization's pipeline system has been reduced by 15-20%, accuracy the

calculation is increased by 12% and the continuous operation of the installation is ensured;

a computational algorithm developed using linearization and characterization methods to solve nonlinear problems about the non-stationary gas dynamic state of a short gas pipeline with various boundary conditions, including with the participation of all unknowns, was applied in Vodiy Shams Electron Mantazh LLC (reference of the Ministry for the Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan No. 33-8/7765 dated November 3, 2021). As a result of the optimal choice of the pipeline diameter and transition elements to another diameter when transporting gas through the pipeline, taking into account the propagation of shock waves, the energy consumption of the installation decreased by 10%, and the reliability of the installation increased by 20%.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, references and appendices. The dissertation volume is 112 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Хужаев И.К., Мамадалиев Х.А., Аминов Х.Х. Modeling of transition processes during pipeline transportation of real gases // Проблемы вычислительной и прикладной математики, 2019. – №2(20). – С. 26-42. (05.00.00; №23).

2. Хужаев И.К., Ахмаджонов С.С., Аминов Х.Х. Решение задачи о закачке газа в элементарный участок трубопровода в приближении «короткого» трубопровода // Узб. журнал: Проблемы механики. – Ташкент, 2019. – №3. – С.35-39. (05.00.00; №5).

3. Khujaev I.Q., Mamadaliyev Kh.A., Aminov X.X., Akhmadjonov S.S. Finite-difference method for solving nonlinear equations of traveling waves in main gas pipelines // Проблемы вычислительной и прикладной математики, 2020. – №5(29). – С. 95-107. (05.00.00; №23).

4. Khujaev I.Q., Mamadaliyev Kh.A., Aminov X.X., Shadmanova G. Mathematical modeling of transition processes due to a change in gas consumption at the ends of the inclined section of the gas pipeline // International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2020). (№3; Scopus IF=0.7)

5. Хужаев И.К., Аминов Х.Х. Применение метода характеристик для решения краевой задачи изменения массового расхода газа для короткого газопровода // Проблемы вычислительной и прикладной математики, – №2(32), 2021. – С. 81-93 (05.00.00; №23).

6. Хужаев И.К., Ахмаджонов С.С., Аминов Х.Х. Применение метода характеристик для решения задачи об элементарном участке газопровода при истечении газа из его конца в окружающую среду // Узб. журнал: Проблемы механики. – Ташкент, №1(30), 2021. – С. 65-75 (05.00.00; №5).

7. I.K. Khujaev, Kh.Aminov, S.Akhmadjonov, A.Ismailov Method of characteristics for the problems of stages of the serviceability check of elementary section of a gas pipeline for operation // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (ИТММ 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 032117. – P. 1-7 (№3; Scopus; IF=0.54).

8. Khujaev, I., Mamadaliyev, K., Aminov, X. Research of the elementary section of a gas pipeline under gas outflow from its end to the environment // 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2021, pp. 01-04 (05.00.00; 30.10.2021 №308/6-сон раёсат қарори) (№3 Scopus IF=0.7).

9. I. Khujaev, O. Bozorov, Kh. Mamadaliyev, and Kh. Aminov Numerical calculation method of pipeline transport of low-compressible fluid //Advances in Mathematics: Scientific Journal 10 (2021), no.5, 2393–2408

II бўлим (II часть; II part)

10. Хужаев И.К., Мамадалиев Х.А., Аминов Х.Х. О решении задач переходных процессов с изменением давления при трубопроводной транспортировке реальных газов // Инновацион ғоялар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда қўллашнинг замонавий муаммолари Халқаро илмий-амалий анжуман материаллари, 15 апрель, 2019. Андижон. – С. 148-150.

11. Хужаев И.К., Мамадалиев Х.А., Аминов Х.Х. Изучение пространственного и временного изменения давления газа при переходных процессах // Фан ва таълим-тарбиянинг долзарб масалалари Республика илмий-назарий анжуман материаллари, 1 апрель, 2019. Нукус. – С. 199-201.

12. Хужаев И.К., Мамадалиев Х.А., Аминов Х.Х. Итерационный метод для решения уравнений трубопроводного транспорта сверхсжимаемого газа // Ахборот-коммуникация технологиялари ва телекоммуникацияларнинг замонавий муаммолари ва ечимлари» Республика илмий-техник анжумани материаллари, 30-31 май, 2019. Фарғона. – С. 238-240.

13. Хужаев И.К., Мамадалиев Х.А., Аминов Х.Х. Газларни қувур орқали ташишнинг чизиқсиз тенгламаларини ечишнинг сонли усули // Доклады Республиканской научно-технической конференции: Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении, 5-6 сентября, 2019. Самарканд. – С. 236-241.

14. Хужаев И.Қ., Мамадалиев Х.А., Аминов Х.Х., Қурбонов С.К. Оғма қувур чизиқли қисмида масса сарфи ўзгаришлари шартда ўтиш жараёнларини математик моделлаштириш // Илм-фан, таълим ва ишлаб чиқаришнинг инновацион ривожлантиришдаги замонавий муаммолари, Халқаро илмий-амалий конфер, 14-16 апрель, 2020. Андижон. – С. 261-263.

15. Махкамов М.К., Мамадалиев Х.А., Аминов Х.Х. Математическая модель для изучения газодинамического состояния рельефного участка газопровода с ресивером // Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: муаммолар ва ечимлар, Халқаро илмий-амалий онлайн анжуман, 27-28 май, 2020. Андижон.– С. 121-124.

16. Хужаев И.Қ., Мамадалиев Х.А., Аминов Х.Х. Численный метод решения задачи о газодинамическом состоянии рельефного участка магистрального газопровода с переменной площадью поперечного сечения // Математик моделлаштириш, ҳисоблаш математикаси ва дастурий таъминот инженериясининг долзарб муаммолари, Халқаро илмий-амалий конференция, 23-24. октябрь, 2020. Қарши. – С. 193-197.

17. Хужаев И.К., Аминов Х.Х. Динамические изменение потока с переходными процессами на участках газопровода // Иқтисодий тармоқларининг инновацион ривожланишида ахборот-коммуникация технологияларининг аҳамияти, Республика илмий-техник анжумани, 4-5 март, 2021. Тошкент. – С. 105-107.

18. И.К.Хужаев, Махкамов М.К., Аминов Х.Х., Тешабоева Г.К. О решении задачи изменения массового расхода газа для короткого газопровода // Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: муаммолар ва

ечимлар, Халқаро илмий-амалий онлайн анжуман, 21 апрель, 2021. Андижон. – С. 142-145.

19. Хужаев И.К., Махкамов М.К., Аминов Х.Х., Тешабоева Г.К. Метод моделирования температуры газа при транспортировке по магистральному газопроводу // Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: муаммолар ва ечимлар, Халқаро илмий-амалий онлайн анжуман, 21 апрель, 2021. Андижон. – С.165-167.

20. Хужаев И.К., Аминов Х.Х. Математическая модель задачи о транспортировке газа в газопроводах с переменным диаметром // Сборник докладов республиканской научно-технической конференции 6-7 сентября, 2021. Тошкент. – С. 299-306

21. Khujaev I.K., Mamadaliyev X.A., Aminov X.X Mathematical modeling of transients in gas pipeline sections // Innovative achievements in science 2021, International scientific-online conference 2021. Челябинск. – С. 44-50.

22. Khujaev I.K., Aminov X.X., Mamadaliyev X.A. About the results of computational experiments in the study of features of transients in the sections of the gas pipeline // Models and methods for increasing the efficiency of innovative research International scientific-online conference, Germany, 2021. – С. 68-75

23. Аминов Х.Х. Газ қувурининг чизикли қисми охиридан атрофмуҳитга газ чиқиши масаласини ечиш учун характеристикалар усулини қўллаш // Journal of new century innovations, 16 апрель 2022. – С. 89-92

24. Аминов Х.Х. Реал газларни қувур орқали узатишда ўтиш жараёнларини математик моделлаштириш // Journal of new century innovations 16 апрель 2022. – С. 98-107

25. Аминов Х.Х., Ахмаджонов С.С., Хужаев И.К. ЭҲМ учун дастур «Рельефли газ қувури чизикли, қўндаланг кесми юзаси ўзгарувчан қисмининг барча куч омилларини инобатга олгандаги газодинамик ҳисоби» // Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги интеллектуал мулк агентлиги № DGU 11381. 15.06.2021 й.

26. Хужаев И.К., Аминов Х.Х., Мамадалиев Х.А. ЭҲМ учун дастур «Қиска газ қувурини характеристикалар усули билан ҳисоблаш дастури»// Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги интеллектуал мулк агентлиги № DGU 13916. 28.12.2021 й.

Автореферат “Информатика ва энергетика муаммолари” Ўзбекистон
журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз
тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

Бичими 84x60 ¹/₁₆ “Times New Roman” гарнитураси рақами босма усулда босилди.
Шартли босма табағи 2,75. Адади 100. Буюртма № 10.

“ЎзР Фанлар академияси Асосий кутубхонаси” босмахонасида чоп этилди.
100170, Тошкент, Зиёлилар кўчаси, 13-уй