

**МЕХАНИКА ВА ИНШОТЛАР СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ
ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН МАШИНАСОЗЛИК ИНСТИТУТИ

АХМАДЖОНОВ САРВАРБЕК СОДИКОВИЧ

**ҚУВУРЛАРДА ГАЗ ҲАРАКАТИ ВА ИМПУЛЬС ТАРҚАЛИШИНИНГ
ЧИЗИҚЛИ ВА ЧИЗИҚСИЗ МОДЕЛЛАРИ**

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

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

Андижон – 2022

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

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

**Contents of Dissertation Abstract of the Doctor of Philosophy (PhD)
on technical Sciences**

Ахмаджонов Сарварбек Содикович

Қувурларда газ ҳаракати ва импульс тарқалишининг чизикли ва чизиксиз моделлари.....3

Ахмаджонов Сарварбек Содикович

Линейные и нелинейные модели движения газов и распространения импульсов в газопроводах.....21

Akhmadjonov Sarvarbek Sodikovich

Linear and nonlinear models of gas movement and pulse propagation in gas pipelines.....39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works42

**МЕХАНИКА ВА ИНШОТЛАР СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ
ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН МАШИНАСОЗЛИК ИНСТИТУТИ

АХМАДЖОНОВ САРВАРБЕК СОДИКОВИЧ

**ҚУВУРЛАРДА ГАЗ ҲАРАКАТИ ВА ИМПУЛЬС ТАРҚАЛИШИНING
ЧИЗИҚЛИ ВА ЧИЗИҚСИЗ МОДЕЛЛАРИ**

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

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

Андижон – 2022

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.2.PhD/T1047 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Андижон машинасозлик институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

Хужаев Исматулла Кушаевич
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Наврузов Куралбай
физика-математика фанлари доктори, профессор

Жумаев Жўрабек
физика-математика фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Самарқанд давлат университети

Диссертация ҳимояси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти ҳузуридаги фан доктори илмий даражасини берувчи DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил "16" "март" соат 14:00 даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100125, Тошкент, Дўрмон йўли кўчаси, 33, 1-мажлислар зали. Тел: (99871) 262-71-52; Факс: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

Диссертация билан Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (10 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел.: (99871) 262-71-52).

Диссертация автореферати 2022 йил «25» февраль куни тарқатилди.
(2022 йил «25» февралдаги 1 рақамли реестр баённомаси).



М.М.Мирсаидов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси,
т.ф.д., профессор, ЎзР ФА академиги

М.К.Усаров
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий
котиби, ф.-м.ф.д., к.и.х.

З.М.Маликов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш
кошидаги илмий семинар раиси, т.ф.д.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда нефть ва газ саноатининг, техника ва технологияларнинг изчил ривожланиши турли моддаларни, иссиқлик ва механик энергияларни узоқ ва қисқа масофаларга узатиш жараёнлари билан узвий боғлиқ. Жумладан, British Petroleum компаниясининг 2020 йил дунё энергетикаси статистикасига доир маълумотларига кўра, «сўнгги йилда дунёда газ истеъмоли ўртача 78 млрд куб метрга ёки 2,5% га ортган. Хусусан, АҚШ (27 млрд куб м га) ва Хитойда (24 млрд куб м га) газ истеъмоли ўсган»¹. Бундай ҳажмдаги газни ишлаб чиқиш ва истеъмолчига етказиб бериш қувурлар тизимининг инновацион гоялар асосида ривожланишини тақозо этмоқда. Худди шундай фикрни нефть ва нефть маҳсулотларини, иссиқлик ва механик энергияларни қувур орқали узатувчи қурилмаларга нисбатан ҳам билдириш мумкин. Шу жиҳатдан газ ташиш жараёнлари учун янги математик моделлар ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш, уларни ишлаб чиқаришга жорий этиш муҳим аҳамият касб этади.

Жаҳонда охириги йилларда узун ва қисқа қувурлар орқали турли моддаларни ташиш жараёнини математик моделлаштиришга катта эътибор берилмоқда ва бу соҳа куч ва энергиянинг қўшимча омилларини ҳисобга олиш шароитларида ривожланиб бормоқда. Жумладан, куч қурилмалари (компрессорлар ва насослар) фаолиятидаги истеъмолчилар қўшилиши ва узилиши, мақсадли маҳсулотнинг оқиб чиқиб йўқотилиши, олиш ва қўшиш ҳажмининг кескин ўзгаришлари ва юзага келадиган ностационар жараёнлар туфайли магистрал қувурлар тизимининг айрим ташкил этувчиларида босимнинг сакраб ўзгаришларини ўрганишга катта эътибор берилмоқда. Бундай ўзгаришлар қувурлар тизимида ностационар қўзғалишларни, ошқоча юкланишларни келтириб чиқаради ва натижада куч қурилмалари ишдан чиқиб, тизимнинг яхлитлиги бузилади, ишончлилиги камайди. Бу соҳада яратилаётган математик ва сонли моделлар бундай ўтиш жараёнларининг тизим ички ва ташқи омилларини тўлиқ ҳисобга олиш лозимлиги бугунги куннинг асосий талабларидан бўлиб қолмоқда.

Республикамизда сўнгги йилларда табиий газ, нефть ва бошқа мақсадли маҳсулотларни истеъмолчиларга керакли микдорда узлуксиз етказиб беришни таъминлаш бўйича кенг кўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... саноатни янада модернизация ва диверсификация қилиш; ... иқтисодиётда энергия ва ресурслар сарфини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган

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

технологияларни кенг жорий этиш»¹ вазифалари белгилаб берилган. Бу йўналишда иқтисодиётнинг турли соҳалари учун катта аҳамиятга эга бўлган мураккаб гидравлик объектларни лойиҳалаш ва фаолиятининг мониторинги билан боғлиқ математик моделларни такомиллаштириш ва амалиётга жорий этишга катта эътибор бериш талаб этилмоқда.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 30 июнда ПҚ-3107-сон «Нефть-газ соҳасининг бошқарув тизимини такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида», 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инновацион гоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияларни ривожлантиришнинг IV. «Математика, механика ва информатика» устувор йўналишига мос равишда бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Қувурлар ёрдамида турли суюқлик ва газларни, механик ва иссиқлик энергиясини узатиш ўз моҳияти билан гидромеханиканинг ички масалалари сирасига киради. Унинг шаклланиши ва ривожланишида И.Никурадзенинг доиравий кесимга эга қувурларда қаршилик қонуниятларини ва Н.Е.Жуковскийнинг водопровод қувурларида зарба тўлқинлари тарқалишини ўрганишга бағишланган ишлари алоҳида ўрин тутди. Хусусан, Н.Е.Жуковский томонида таклиф этилган квази бир ўлчовли математик модель бугунги кунда ҳам ўз долзарблигини йўқотмаган ва муайян ўзгаришлар киритиш орқали ўз даврининг масалаларига мослаштириб келинмоқда. Газ қувурлари тизими фаолияти ва уларда зарба тўлқинларининг тарқалиши масалалари Л.С.Лейбензон, И.А.Чарний, В.П.Юфин, А.А.Ионин, Л.В.Шухов, Э.А.Бондарев, Э.В.Галиакбаров, Е.В.Груничев, Н.Н.Ермолаева, В.С.Кулик, Г.И.Курбатова, К.Ф.Синьков, Hang Zhang, J.Szoplik, Maciej Chaczykowski, M.Guillyn, M.Carlos, Atlas V. Akhmetzyanov ва бошқалар томонидан ўрганилган.

Республикамизда қувурлар орқали турли муҳитларни узатиш йўналишида Ж.Ф.Файзуллаев, Қ.Ш.Латипов, В.К.Мукук, А.А.Ҳамидов, Ж.Акилов, Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Р.Садуллаев, И.Қ.Хўжаев, О.Ш.Бозоров, М.Маматкулов, О.М.Арифжанов, С.И.Худайкулов, А.М.Фатхуллаев, У.У.Жонқобилов, М.К.Маҳкамов, М.Х.Мамадалиев,

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

Ш.К.Болтибаев каби тадқиқотчилар иш олиб боришган ва қувурлар тармоғи ҳамда қисмларига тегишли аҳамиятли натижаларга эришишган.

Стационар ва мобиль объектларда қўлланиладиган қувурлар тизимлари замон талабига мос ривожланиб, такомиллашиб бормоқда. Уларда энергия ва ресурслар сарфини камайтириш, фаолиятининг ишончилигини ошириш борасида кенг камровли ишлар олиб борилмоқда. Мазкур диссертация иши ҳам шу йўналишда бажарилган ишлар сирасига киради.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган муассасанинг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши ЎзР ФА Механика ва иншоотлар сейсмик мустақамлиги институти “Суюқлик, газ ва гидроуритмалар тизимлари механикаси” лабораториясининг 2019-2021 йил илмий тадқиқот режалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади киска ва узун қувурлар яқинлашувида газ қузури элементар қисми фаолияти ва унда тўлқинлар тарқалишига доир чизиқли ва чизиқли бўлмаган масалаларни ечиш усулларини такомиллаштиришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

қувурлар элементар қисмлари ва тармоқларини ҳисоблашнинг назарий асослари ва усулларини таҳлил этиш;

киска ва узун қувур яқинлашувларида элементар қисм чегараларида масса сарфи ўзгариши масалаларининг ечимларини қуриш ва улар асосида сонли тажриба ўтказиш;

Н.Е.Жуковскийнинг газ оқиб чиқиши тезлигининг чекли эканлигига доир гипотезаси асосида опрессовка (қувурнинг ишлашга тайёрлигини текшириш) масалаларини шакллантириш ва уларни ечиш;

газ инерцияси локал ташкил этувчиси ва каршилиқнинг квадратик конунини ҳисобга олувчи масалаларни ечиш усулини ишлаб чиқиш;

бир томондан чегараланган газ қувурларида ўтиш жараёнига доир масалаларни шакллантириш ва уларни ечиш усулларини ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти сифатида магистрал газ қувурлари фаолияти ва уларда тўлқин тарқалиши жараёнларининг математик моделлари олинган.

Тадқиқот предметини турли жараёнларда газ қузури элементар қисмида кечадиган газодинамик ўзгаришлар ташкил этади.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқотни олиб бориш жараёнида математик моделлаштириш, оддий ва хусусий ҳосилали тенгламалар системаларини аналитик ва сонли ечиш усулларида, сонли натижаларни визуаллаштириш технологияси усулларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

киска ва узун газ қувурлари яқинлашувларида масса сарфи ўзгариши билан кечадиган ўтиш жараёнларига доир газодинамика масалалари шакллантирилган ва улар учун Фурье усулига асосланган аналитик ечиш усули ишлаб чиқилган;

киска қувур охирларида масса сарфи ўзгариши ва Н.Е.Жуковскийнинг газ оқиб чиқиши тезлигига доир формуласига асосланган чегаравий шартлар берилганда қувур газодинамик ҳолати чизиксиз масаласини характеристикалар усули асосида ечиш усули ишлаб чиқилган;

югурувчи тўлқинлар ёрдамида олинган таянч ечим ва Даламбер ечими асосида қувурда тўлқин тарқалиши масаласининг квадратик қаршилиқ конуни учун тезликка нисбатан аналитик ечими қурилган;

бир томондан чекланмаган газ қувурлари учун бошқа масса сарфига ўтиш масаласининг бошланғич шартларнинг турли берилишларида, жумладан Хэвисайд ва Диракнинг дельта функциялари, чизикли функция ҳоллари учун масса сарфига нисбатан аналитик ечимлари қурилган;

муайян кўрсаткич учун аналитик ечимлар асосида қолган кўрсаткичлар майдонини сонли аниқлаш учун алгоритмлар ишлаб чиқилган ҳамда зичланиш ва сийракланиш тўлқинлари тарқалиши хусусиятлари аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

ўтиш жараёнларида босим сакрашини аниқлаш усуллари яратилган;

киришда берилган босим ёрдамида газни қандай масофагача узатиш мумкинлигини аниқловчи усул таклиф этилган ва қувур диаметри ҳамда калинликларини аниқлашда қўлланилган;

газ қувури элементар қисмига газ қамаш ва уни чиқариб юборишга кетадиган вақтни талаб этиладиган даражадаги босим доирасида аниқлаш учун формулалар ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги фойдаланилган тенгламалар ва шартларда импульс ва масса сақланиш қонунларига қатъий риоя қилинганлиги, сонли усуллардан фойдаланилганда зарурий аниқлик таъминланганлиги, ҳисоб натижаларининг ўрганилаётган жараёнларнинг табиатига мослиги билан изоҳланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти қатор масалаларни ечиш учун аналитик ва сонли усулларни биргаликда қўллаш услубияти ишлаб чиқилгани билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти улардан газ қувурлари тизими фаолиятида энергия сарфини камайтириш ва тизимнинг ишончлилигини ошириш мақсадида фойдаланиш имконини бериши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Қувурларда газ ҳаракати ва импульс тарқалишининг чизикли ва чизиксиз моделларини қуриш асосида олинган натижалар:

«ФА-Атех-2018-414» амалий лойиҳани бажариш жараёнида қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг 2021 йил 4-ноябрдаги №2/1255-3037-сонли маълумотномаси). Натижада кон-металлургия комбинатларида қаттиқ заррачаларнинг турли концентрацияли кўп фаза

мухитларни ламинар ва турбулент оқимларининг моделлари шакллантирилган ва энергия сарфини 6% га камайтиришга эришилган;

«Universal elegant lyuks» МЧЖ да газни қувур орқали узатишда ҳосил бўладиган зарба тўлқинлари тарқалиши ҳолида босимнинг максимал ва минимал кийматларини топиш ва улар асосида қувур диаметри ва калинлигини аниқлаш жараёнида фойдаланилган ("Ўзбекистон Миллий Электр тармоқлари" АЖнинг 2021-йил 20-декабрдаги 01-04-08/4594-сон маълумотномаси). Натижада қўлланилаётган қурилманинг ишончлилиги 20 %га ошган, энергия сарфи 6 %га камайтирилган;

«Худудгаз Андижон» газ таъминот филиалининг Андижон шахрига тегишли қувурлар тизимида босим сакрашларини аниқ ҳисоблаш мақсадида фойдаланилган ("Ўзбекистон Миллий Электр тармоқлари" АЖнинг 2021-йил 20-декабрдаги 01-04-08/4594-сон маълумотномаси). Натижада ҳисоблаш жараёнига кетадиган вақт 15-20 %га қисқарган, аниқлик 12 %га ошган ва қурилманинг ишончлилиги ортган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 7 та халқаро ва 2 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 21 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, 3 таси (2 та Scopus базасига кирувчи) хорижий ва 6 таси республика нашрларида чоп этилган. ЭҲМ учун дастурий маҳсулот қайд этилганлиги ҳақида 3 гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, тўрт боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 120 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Ишнинг **Кириш** қисмида Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияни 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 очиқ берилган, тадқиқот натижалари амалиётга жорий этилганлиги, чоп этилган ишлар ҳақида маълумотлар ва диссертация ишининг тузилиши келтириб ўтилган.

Диссертациянинг «**Қувурларда мухитни ташиш ва кўзғалиш тўлқинлари тарқалиши муаммоларининг ўрганилганлик даражаси**» деб номланган биринчи боби уч параграфдан иборат.

1.1-параграфда қувурлардан фойдаланишнинг назарий асосларига бағишланган илмий манбалар таҳлил қилинган.

Қаттиқ жисм ва суюқлик ҳаракати хусусиятлари, Ньютон суюқликлари учун Навье-Стокс тенгламасини асослашда масса ва импульс сақланиш ҳамда кучланиш тензори тенгламалари муҳокама қилинган. Ортогонал координаталарда ва соддалаштирилган вариантларда Навье-Стокс тенгламасидан фойдаланиш вариантлари келтирилган. Д.Андерсон, Ю.П.Коротаев, В.Е.Селезнев, А.З.Миркин, И.О.Протодьяконов, В.Ф.Новоселов, Giulio Guandalini, Aline Barbosa Figueiredo, Yu.D.Zemenkov, Д.Ф.Файзуллаев, З.М.Маликов сингари олимларнинг ишлари, Web of Science платформасидаги илмий журналлар мақолалари ва ватанимиз олимларининг бир қатор ишлари таҳлил қилинган.

1.2-параграфда қувурлар тармогининг тузилиши, вазифалари, гидродинамик ва энергетик режимлари ва бошқа кўрсаткичлари бўйича хусусиятлари муҳокама этилган. Бу ерда қувурдаги оқимнинг бешта гидродинамик режими ҳолати, магистрал газ қувурлари ва тақсимлаш тармоқларининг ривожланиш масалаларини ва уларни ечиш усулларини ишлаб чиқишга бағишланган Д.Н.Попов, Е.В.Сеннова, А.Р.Акбасов, А.К.Николаев, Г.П.Комина, Г.И.Курбатова, П.С.Кунина, Shailesh Chandraa, Peng Shanbi, И.К.Хужаев ва бошқаларнинг ишлари таҳлил қилинган.

1.3-параграфда газ узатиш ва импульс ҳамда босим сакрашлари тарқалишларига доир масалаларни ечиш усулларига бағишланган адабиётлар таҳлил қилинган. Газ ва суюқликларни қувурлар орқали узатишда муҳит ва оқим бирор кўрсаткичининг ихтиёрий ўзгариши қувур тармоғи барча чизикли қисмлари бўйлаб бу ўзгаришларнинг тарқалишига олиб келади. Н.Е.Жуковский, И.А.Чарний, В.В.Грачев, В.С.Кулик, С.А.Бобровский, А.В.Адоевский, Э.А.Бондарев, А.Д.Тевяшев, Р.Садуллаев ва уларнинг ўқувчиларининг бир қатор ишлари қувурда босим кўзгалишлари тарқалишини ўрганишга бағишланган.

Ушбу параграфнинг охирида қисқа ва узун қувур ёндашуви хусусиятлари изоҳлаб ўтилган. Газ қувури элементар қисқа ва узун чизикли қисмида газодинамик кўрсаткичларнинг сакрашлари ҳосил бўлиши ва тарқалиши масалалари муҳокама қилинган.

Муаммонинг ўрганилганлик ҳолати таҳлили ва газларни қувур орқали узатишдаги долзарб муаммолардан келиб чиққан ҳолда тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилди.

Диссертациянинг «**Фурье ва характеристикалар усуллари билан қисқа қувурда идеал газ масса сарфи сакрашлари тарқалишининг тадқиқи**» деб номланган иккинчи боби икки параграфдан иборат.

2.1-параграфда “қисқа” қувур яқинлашувида, яъни босим градиенти фақат инерция кучининг локал ташкил этувчиси билан ифодаланганда қувур чизикли қисми боши ва охирида масса сарфи сакраб ўзгаришларининг математик модели шакллантирилган ва мос масала аналитик ечилган.

Изотермик режимда идеал газ ва суюқликнинг қисқартирилган тенгламалари билан ифодаланган:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial t}, \quad -\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}. \quad (1)$$

Бу ерда ва кейинги ҳолларда p , ρ , w – ташилаётган муҳитнинг вақтнинг t momentiда x кесимда ўртача босими, зичлиги ва тезлиги; D , $f = \pi D^2 / 4$ – қувурнинг диаметри ва қўндаланг кесими юзаси; $c = \left(\frac{\rho_0}{k_{жс}} + \frac{2R_0 \rho_0}{E\delta} \right)^{-1/2}$ – муҳит-қувур тизимида босим кичик қўзғалишларининг тарқалиши тезлиги; ρ_0 – қўзғалмаган суюқлик зичлиги; E , $k_{жс}$ – қувур материали ва узатилаётган муҳитнинг эластиклик модуллари; R_0 – қўзғалишлар бўлмаган ҳолда қувурнинг ички радиуси; δ – доиравий қувур деворининг қалинлиги.

Ушбу тенгламалар системаси масса $M = \rho w f$ сарфини киритиш билан чиқиқлилаштирилган ва масса сарфига нисбатан гиперболик тенглама қўринишида ифодаланган:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Бошлангич ва чегаравий шартлар сифатида $0 \leq x \leq l$, $t < 0$ бўлганда $M(x, 0) = M_0 = const$, $\frac{\partial M(x, 0)}{\partial t} = 0$, $t \geq 0$ бўлганда $M(0, t) = M_K = const$, $M(l, t) = M_{\text{ч}} = const$ олинди, бу ерда M_K ва $M_{\text{ч}}$ – $t \geq 0$ вақтда қисм боши ва охиридаги масса сарфи қийматлари. Масса сарфи учун Дирихле масаласига, босим учун эса Нейман масаласига келинган.

Масса сарфига нисбатан масаланинг ечимини стационар ва ностационар қисмлар йигиндиси шаклида қидирилди ва тенглама ўзгарувчиларни ажратиш усулида ечилди.

Масаланинг масса сарфи учун даврий ечими топилди:

$$M(x, t) = M_K + \frac{x}{l} (M_{\text{ч}} - M_K) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos \frac{\pi n c t}{l} \sin \frac{\pi n x}{l}. \quad (3)$$

Босим учун қуйидагича ечим олинди:

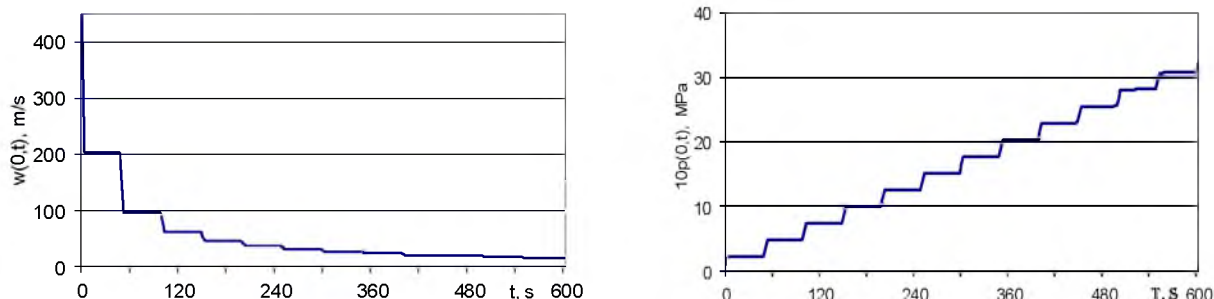
$$p(x, t) = p_0 + \frac{M_K - M_{\text{ч}}}{l f} c^2 t - \frac{c}{f} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{\pi n c t}{l} \cos \frac{\pi n x}{l}, \quad (4)$$

бу ерда $b_n = \frac{2}{\pi n} \left\{ [(-1)^n - 1] (M_K - M_0) + (-1)^n (M_{\text{ч}} - M_K) \right\}$.

Кам сиқилувчан муҳит учун тезлик $w(x, t) = \frac{c^2 M(x, t)}{f p(x, t)}$, ўта сиқилувчан

муҳит учун $w(x, t) = \frac{ZRT}{f} \frac{M(x, t)}{p(x, t)}$ формула билан топилди. Бу ерда Z , R , T – газнинг ўта сиқилувчанлик коэффициенти, газ доимийси ва ўртача ҳарорати.

Ўта сиқилувчан газ учун ҳисоблашлар қисмда масса сарфи ва бошлангич босимнинг турли қийматларида куйидаги ўзгармаслар учун олиб борилди: $R = 528 \text{ Ж} / (\text{К} \cdot \text{кг})$, $c = 400 \text{ м} / \text{с}$, $D = 0.992 \text{ м}$, $T = 297.15 \text{ К}$, $z = 0.920$, $l = 0.5, 1, 2, 5, 10 \text{ км}$. $p_0 = 0.1 \text{ МПа}$, $M_0 = M_q = 0 \text{ кг} / \text{с}$ холида киришда масса сарфи $M_K = 250 \text{ кг} / \text{с}$ ни ташкил этганида олинган натижалар 1-расмда келтирилди.



1-расм. Қувур элементар қисмига газ камашда вақт бўйича газ тезлиги ва босимнинг кириш кесимида ўзгариши.

$$l = 10,0 \text{ км}, p_0 = 0,1 \text{ МПа}, M_0 = M_q = 0 \text{ кг} / \text{с}, M_K = 250 \text{ кг} / \text{с}$$

2.2-параграфда қувурнинг чизикли қисми киришида Н.Е.Жуковскийнинг газ оқиб чиқишининг тезлиги чекланганлиги ҳақидаги формуласидан фойдаланиб, қисмдан газ оқиб чиқиши ва қисмга штуцер орқали газ камаш масалалари қисқа қувур ёндашувида шакллантирилди ва характеристикалар усулида ечилди.

$D = \{(x, t) : 0 < x < l, 0 < t < T\}$ соҳада жараёни моделлаштириш учун куйидаги тенгламалардан фойдаланилди:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{c^2}{f} \frac{\partial M}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{f} \frac{\partial M}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Бошлангич ва чегаравий шартлар сифатида $p(x, 0) = p_0(x)$, $M(x, 0) = M_0(x)$, $0 \leq x \leq l$, $p_H(t) - p(0, t) = \alpha M(0, t)$, $0 \leq t \leq T$, $\partial p(l, t) / \partial x = \varphi(t)$, $0 \leq t \leq T$ олинди, бу ерда $\alpha = c/s$ (s – штуцер кесими юзаси). (5)

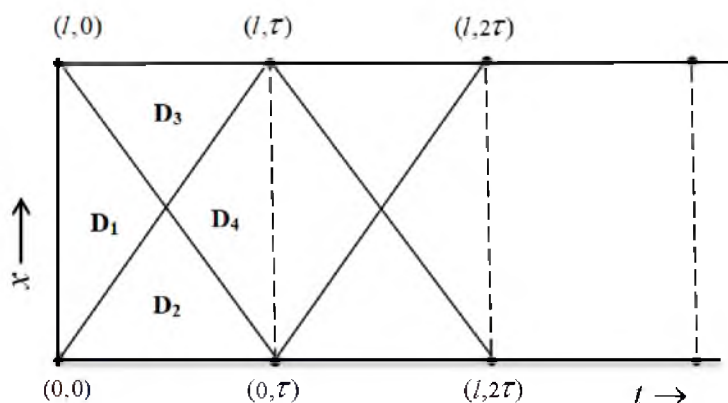
тенгламаларга югурувчи тўлқин аналогларини $u(x, t) = p(x, t) + \frac{c}{f} M(x, t)$ ва

$v(x, t) = p(x, t) - \frac{c}{f} M(x, t)$ киритилди ва янги номаълумларга нисбатан тенгламалар системаси ҳосил қилинди:

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

Бошлангич ва чегаравий шартлар $u(x, 0) = \varphi_1(x)$, $v(x, 0) = \varphi_2(x)$, $0 \leq x \leq l$, $K_1 u(0, t) = K_2 v(0, t) + p_H(t)$, $\frac{\partial u(l, t)}{\partial x} + \frac{\partial v(l, t)}{\partial x} = 2\varphi(t)$, $0 \leq t \leq T$ кўринишни олади,

бу ерда $\varphi_1(x) = p_0(x) + \frac{c}{f}M_0(x)$, $\varphi_2(x) = p_0(x) - \frac{c}{f}M_0(x)$, $K_1(x) = \frac{\alpha f}{2c} + \frac{1}{2}$,
 $K_2(x) = \frac{\alpha f}{2c} - \frac{1}{2}$.



$u(x,t)$ ва $v(x,t)$ ёрдамчи функцияларга нисбатан ечим $t \in (0, \tau]$ ($\tau = l/c$) вақт оралиги учун характеристикалар усулида олинди. Бу натижалардан вақтнинг кейинги оралиқлари учун фойдаланишнинг алгоритми тузилди.

2-расм. Ҳисоблаш соҳасини вақт полосалари ва D_1 , D_2 , D_3 ва D_4 соҳастиларга бўлиниши

Олинган ечимлар $p_H(t) = p_{at}$, $\alpha = c/s$, $M(l,t) = 0$

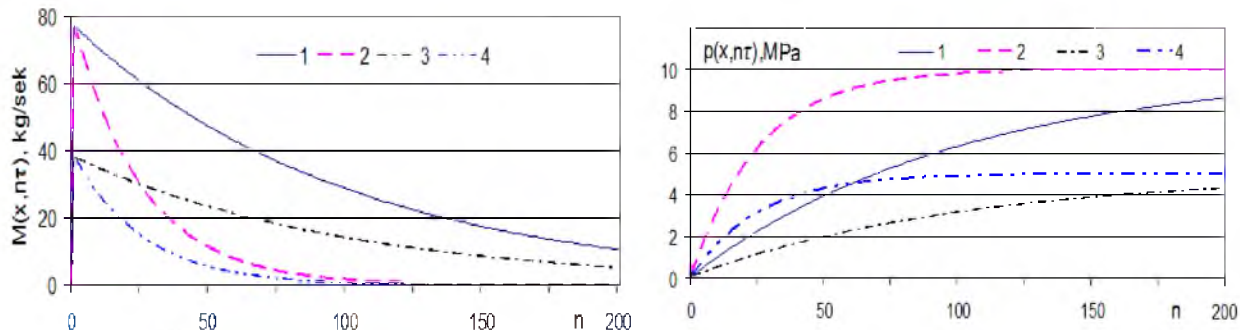
параметрларга мос масалага қўлланилди. Бу – чиқиш кесими беркитилганда s юзали штуцер орқали кириш кесимидан газ оқиб чиқиши масаласи. Бошланғич шартлар $M(x,0) = 0$, $p(x,0) = p_0 (> p_{at})$ учун $(0, \tau]$ ораликқа мос ечим олинди ва унинг асосида $n\tau$ вақт учун рекуррент боғланишлар қурилди:

$$p_n = p(x, n\tau) = \frac{p(x, (n-1)\tau) + kp_H}{1+k}, \quad M_n = M(x, n\tau) = \frac{1}{2cK_1} [p_H - p(x, (n-1)\tau)].$$

Ушбу формулалар асосида $k = s/f$ учун кўрсаткичларнинг вақт бўйича экспоненциал ўзгариши қонуниятлари топилди.

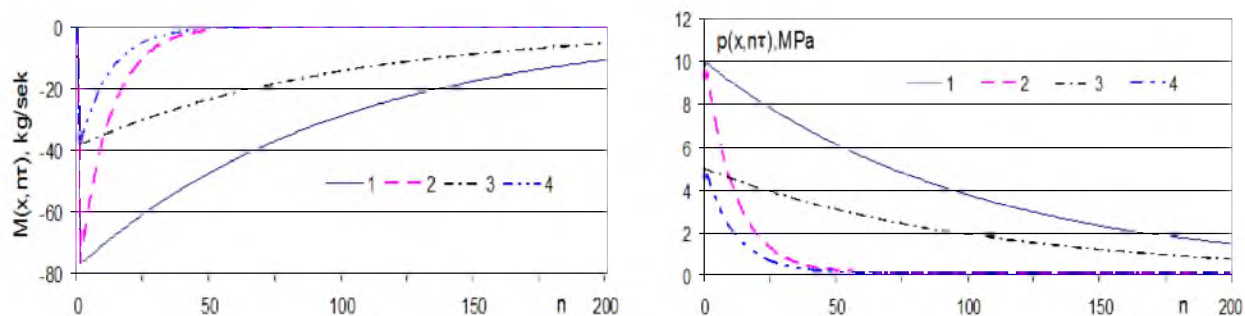
$$p_n = (p_0 - p_H) e^{-n \ln(1+k)} + p_H, \quad M_n = (p_H - p_0) e^{-n \ln(1+k)}, \quad w_n = \frac{4ck}{1 + \frac{p_H}{p_H - p_0} e^{-n \ln(1+k)}}$$

3- ва 4-расмларда ушбу формулалар асосида олинган натижалардан намуналар келтирилди.



3-расм. Ўзгармас босим остида газ қамашда вақтнинг дастлабки икки юз $\tau = l/c$ қадамида масса сарфи ва босимнинг ўзгариши.

- 1 - $p_H = 10$ МПа, $k = 0.01$; 2 - $p_H = 10$ МПа, $k = 0.04$;
 3 - $p_H = 5$ МПа, $k = 0.01$; 4 - $p_H = 5$ МПа, $k = 0.04$



4-расм. Қувур қисмидан газ оқиб чиқиши ҳолида вақтнинг дастлабки икки юз

$\tau = l/c$ кадамида масса сарфи ва босимнинг ўзгариши.

1 – $p_0 = 10$ МПа, $k = 0.01$; 2 – $p_0 = 10$ МПа, $k = 0.09$;

3 – $p_0 = 5$ МПа, $k = 0.01$; 4 – $p_0 = 5$ МПа, $k = 0.09$

Учинчи боб «Узун қувур ёндашуви доирасида газни қувур орқали узатиш масалаларининг ечимлари» икки параграфдан иборат. Бу ёндашувда босим градиенти фақат қаршилик кучи билан ифодаланadi.

Бобнинг биринчи параграфида дастлабки масса сарфи M_0 бўлганида l узунликдаги қувур қисми киришида масса сарфи M_K , чиқишида эса M_Q га ўзгариши масаласи қаралди. Чизиқлаштирилган тенгламалар куйидагича қабул қилинди:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2a}{f} M = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{f}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

бу ерда $2a = \lambda w_* / (2D)$ – ўзгармас катталиқ.

Масса сарфига нисбатан $\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{c^2}{2a} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$ тенглама курилди ва Фурье усулида унинг ечими олинди:

$$M(x, t) = M_K + (M_Q - M_K) \frac{x}{l} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) \sin \frac{\pi n x}{l},$$

$$a_n = \frac{2}{\pi n} \left\{ [(-1)^n - 1] (M_0 - M_K) - (-1)^n (M_Q - M_K) \right\}.$$

Ушбу ифодалар асосида (6) тизимдан босим учун ечим олинди:

$$p(x, t) = p_K + \frac{x}{l} (p_Q - p_K) - \frac{c^2}{f} \frac{M_Q - M_K}{l} t -$$

$$-\frac{2a}{f} \left(M_K x + \frac{M_Q - M_K}{2l} x^2 \right) + \frac{2a}{f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n l}{\pi n} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) \cos \frac{\pi n x}{l}.$$

Ечимлардан кам ва ўта сиқилувчан муҳитлар учун фойдаланиш йўллари кўрсатилди. Чегаравий кесимлар беркитилишининг уч хил варианты учун графиклар берилди ва муҳокама қилинди.

3.2-параграфда қувур орқали изотермик режимда газ узатиш тенгламаларида инерция кучининг локал ташкил этувчиси ва квадратик конун билан ифодаланган қаршилик кучини биргаликда ҳисобга олган ҳолда

яримчексиз кувурда газ тезлиги ҳақидаги масаланинг аналитик ечими олинди ва босим майдонини аниқлаш учун сонли алгоритм ишлаб чиқилди.

Жараён куйидаги тенгламалар асосида моделлаштирилди:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \varepsilon \rho w^2, \quad -\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial \rho w}{\partial x}, \quad (7)$$

бу ерда $\varepsilon = \lambda/2D$ – Дарси-Вейсбах қонунида қаршилик кучи параметри.

Куйидаги шартлар қўйилди: $w(0,t) = \mu(t)$, $w(\infty,t) \rightarrow 0$, $w(x,0) = \phi(x)$, $\partial w(x,0)/\partial t = \psi(x)$.

Реал газ ҳолати тенгламаси $p = c^2 \rho$ ($c^2 = ZRT$) ни ҳисобга олган ҳолда янги номаълум $\varphi = \ln(\rho/\rho_*)$ функция киритиш орқали (ρ_* – газнинг характерли зичлиги) тенгламалар тизими (7)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\varepsilon w^2, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0$$

кўринишда ёзиб олинди.

Югурувчи тўлқинларга $A = w + c\varphi$, $B = w - c\varphi$ нисбатан тенгламалар тузилди. Тузилган янги тенгламаларга субстанционал ҳосила киритилди ва $w(x,t) = [A(\eta,t) + B(\xi,t)]/2$ тезликка нисбатан тенглама тузилиб,

масаланинг тезликка нисбатан таянч ечими топилди: $w = w^0 / \left(1 + \frac{\varepsilon x}{c} w^0\right)$.

w^0 қийматни аниқлаш учун Даламбернинг ечимига мурожаат қилинди:

$$w^0(x,t) = \frac{\Phi(x+ct) - \Phi(x-ct)}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_{x-ct}^{x+ct} \Psi(\alpha) d\alpha,$$

бу ерда Φ ва Ψ – $t=0$ да қидирилаётган функция ва унинг вақт ҳосиласи қийматлари.

$x=0$ да қидирилаётган функция нолга тенг қийматга эга бўлиши учун

$$\Phi(x) = \begin{cases} \phi(x) & \text{агар } x > 0 \\ -\phi(x) & \text{агар } x < 0 \end{cases} \quad \text{ва} \quad \Psi(x) = \begin{cases} \psi(x) & \text{агар } x > 0 \\ -\psi(x) & \text{агар } x < 0 \end{cases}$$

деб қабул қилинди.

$x=0$ кесимда тезликнинг янги қиймати $\mu(t)$ ни ҳисобга олиб, $w^0(x,t)$ учун масала шакллантирилди. w^0 нинг бу қийматини таянч ечимга қўйиб тезлик учун охириги натижа олинди:

$$w(x,t) = \begin{cases} \frac{\mu\left(t-\frac{x}{c}\right) + \frac{1}{2}[\phi(x+ct) - \phi(x-ct)] + \frac{1}{2} \int_{ct-x}^{x+ct} \psi(\alpha) d\alpha}{1 + \frac{\varepsilon x}{c} \left\{ \mu\left(t-\frac{x}{c}\right) + \frac{1}{2}[\phi(x+ct) - \phi(x-ct)] + \frac{1}{2} \int_{ct-x}^{x+ct} \psi(\alpha) d\alpha \right\}} & \text{агар } x \leq tc, \\ \frac{\frac{1}{2}[\phi(x+ct) - \phi(x-ct)] + \frac{1}{2} \int_{x-ct}^{x+ct} \psi(\alpha) d\alpha}{1 + \frac{\varepsilon x}{c} \left\{ \frac{1}{2}[\phi(x+ct) - \phi(x-ct)] + \frac{1}{2} \int_{x-ct}^{x+ct} \psi(\alpha) d\alpha \right\}} & \text{агар } x > tc. \end{cases}$$

Босим ва зичлик кўзгалишлари тарқалишларини аниқлаш учун сонли усулларга мурожаат қилинди. Дискрет координаталарга ўтишда импульс сакрашлари нукталари ҳисоблаш тугунларида бўлди. Агар фазовий кадам h ни ташкил этса, вақт бўйича кадам $\tau = h/c$ ни ташкил этади.

Берилганларнинг $M(t) = 0 = const$, $\phi(x) = 0$, $\psi(x) = 0$, $\varphi(x,0) = 0$ холи учун дастур тузилди, U ε ларнинг турли қийматлари учун сонли натижалар олинди.

Импульс тўлқини $x = nh$ координатага мос тугунга етиб борганида бу нуқтада газ тезлиги $w_n^n = \frac{U}{1 + (\varepsilon nh/c)U}$ ни ташкил этади. x бўйича

кўзгалишлар фронтдан кейинги тугунларда газ тинч ҳолат сакланишини ҳисобга олиб, тўлқин фронтда ёрдамчи функциянинг қиймати топилди: $\varphi_n^n = \tau w_n^n / h$. Ушбу муносабатни потенциаллаб, n -вақт қадами учун кўзгалиш фронтда зичлик ва босимнинг қийматлари аниқланди:

$$\rho_n^n = \rho_* \exp(U/(c + \varepsilon nhU)), \quad p_n^n = P \exp(U/(c + \varepsilon nhU)).$$

Чекли-айирмалар усулидан фойдаланиб, $i = n-1..0$ тугунларда ёрдамчи функция қийматини топиш учун

$$\varphi_i^n = \varphi_{i+1}^n + \frac{h}{c^2} \left[\frac{w_{i+1}^n - w_{i+1}^{n-1}}{\tau} + \varepsilon (w_{i+1}^n)^2 \right]$$

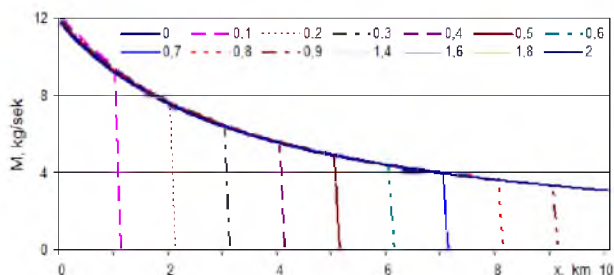
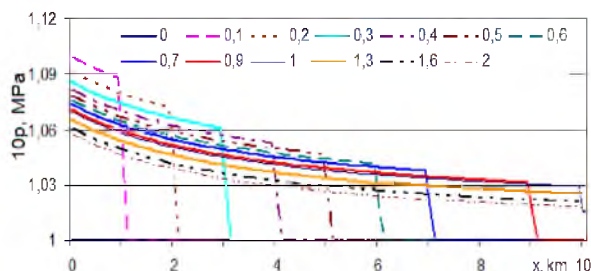
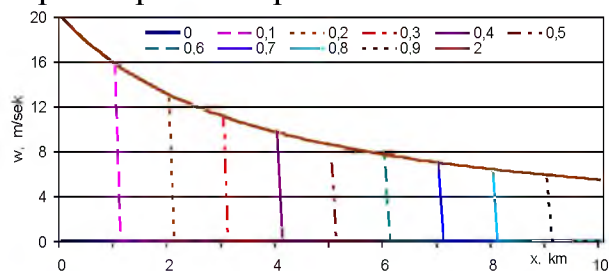
рекуррент формула олинди. Бу ерда босимнинг ўзгаришлари импульс тўлқинлари тарқалиши йўналишига тесқари йўналишда содир бўлишини ҳисобга олдик.

Келтирилган формула асосида w_i^n нинг қиймати ва марш усулида ёрдамчи φ_i^n функциянинг қиймати ҳисобланиб, тезлик ва ёрдамчи функция майдонлари топилади. Тўр тугунларида газ зичлиги, газ босими ва газнинг масса сарфи қуйидаги формулалар орқали топилди:

$$\rho_i^n = \rho_* \exp(\varphi_i^n), \quad p_i^n = c^2 \rho_i^n, \quad M_i^n = f \rho_i^n w_i^n.$$

$\varepsilon = 0.005 \text{ м}^{-1}$, қаршилик коэффиценти 0.01 ва қувур диаметри 1 м бўлган ҳол учун ҳисоб тажрибалари ўтказилди. Бошлангич ҳолат – тинч, қисм

бошида тезлик 0 м/с дан сакраб 20 м/с га ортиши холи каралди. Товуш тезлиги $378,21 \text{ м/с}$ ни ташкил этди. Қуйида олинган натижаларнинг айримлари келтирилган.



5-расм. Масофа бўйича тезлик, босим ва масса сарфи ўзгаришлари.

$$D = 1.0 \text{ м}, \lambda = 0.01, c = 378.21 \text{ м/с},$$

$$U = 20 \text{ м/с}, p_{00} = 0.1 \text{ МПа}, \varepsilon = 0.005 \text{ м}^{-1}$$

Узунлик бўйича оқим тезлиги гиперболик қонун билан камаяди. Фронтда тезлик қиймати $ct/l = 0.1$ да 15.8177 м/с , $ct/l = 0.4$ да 9.7199 м/с , $ct/l = 1$ да 5.4884 м/с ни ташкил этди.

Қувур чизикли қисмига киришда $ct/l = 0.01$ бўлганида масса сарфи 12.190 кг/с ни ташкил этади, $x = 0.1 \text{ км}$ да 11.264 кг/с гача камаяди. Кейин сакраб 0 кг/с гача камаяди. Вақт ўтиши билан киришда масса сарфи камайиб боради: $ct/l = 0.50$ да 11.844 кг/с , $ct/l = 1.00$ да 11.746 кг/с , $ct/l = 2.00$ да 11.700 кг/с .

Диссертациянинг «Яримчексиз қувурда импульс ва босим кўзғалишларининг тарқалиши ҳақидаги масалаларни ечишнинг аналитик-сонли усули» деб номланган тўртинчи боби уч параграфдан иборат. Бу бобда киришдаги масса сарфининг янги M_1 ўзгармас қиймати ва бошлангич масса сарфининг $x \in (0, \infty)$ ораликдаги $f(x)$ таксимоти берилганда яримчексиз қувурда газнинг динамик ҳолати масаласининг умумий ва хусусий ечимлари олинган.

Масса сарфига нисбатан тенглама $\frac{\partial M}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$ шаклига келтирилган. Бу

ерда $a^2 = 2Dc^2/\lambda u_*$. Хатолик $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\mu^2} d\mu$ интегралидан фойдаланиб,

масаланинг умумий аналитик ечими олинди:

$$M(x,t) = M_1 \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) \right] + \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \int_0^{+\infty} f(\xi) \left[e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2 t}} - e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4a^2 t}} \right] d\xi.$$

Ечимни берилган тенгламалар системасининг биринчи тенгласига кўйиш ва олинган муносабатларни интеграллаш йўли билан босим динамикасини тадқиқ этиш учун сонли ечиш усулидан фойдаланилди.

4.2-параграфда масса сарфи бўйича бир режимдан бошқа режимга ўтиш ҳақидаги масала қаралган. Бу ўзгармас M_1 масса сарфидан киришда янги M_2 масса сарфи режимига оний ўтиш масаласига мос келади:

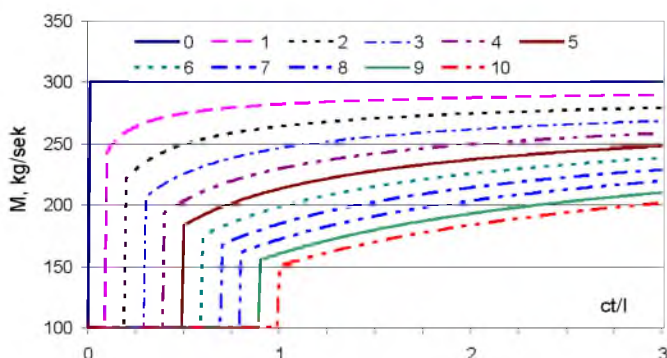
$$f_1(x) = \begin{cases} M_1 & \text{агар } x > 0, \\ M_2 & \text{агар } x < 0. \end{cases}$$

Бу масаланинг аналитик ечими қуйидагича бўлди (6-расм):

$$M(x,t) = \frac{M_2 + M_1}{2} + \frac{M_1 - M_2}{2} \Phi\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right).$$

Хатолик интегрални қийматини ҳисоблаш учун $\Phi(x) = 1 - (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5) e^{-x^2} + \varepsilon(x)$ аппроксимация формуласидан фойдаланилди: бу ерда $t = 1/(1 + px)$, $p = 0,3275911$, $a_1 = 0,254829592$, $a_2 = -0,284496736$, $a_3 = 1,421413741$, $a_4 = -1,453152027$, $a_5 = 1,061405429$. Бундай аппроксимация аниқлиги $|\varepsilon(x)| \leq 1,5 \cdot 10^{-7}$ ни ташкил этади.

Босим кўзгалишларини аниқлаш учун 3.2-параграфдаги сингари сонли усулдан фойдаланилди.



6-расм. Киришда масса сарфининг 100 кг/с дан 300 кг/с га ўтишида газ масса сарфининг вақт бўйича тақсимоти.

$$l = 10 \text{ км}, \quad D = 1.0 \text{ м}, \quad h = l/1000,$$

$$p(0,0) = 5.6 \text{ МПа}, \quad \lambda = 0.01,$$

$$R = 518.26 \text{ Ж/К}^{-1} \text{ кг}^{-1}, \quad T = 300.0 \text{ К},$$

$$z = 0.92, \quad u_* = 20 \text{ м/с}$$

4.3-параграфда масса сарфи бошлангич тақсимоти бўлакли-ўзгармас кўринишга эга бўлганда масалалар қаралган. Масса сарфи бошлангич тақсимоти $[0; l]$ ораликда M_1 , қувурнинг қолган қисмларида эса M_2 бўлган ҳолдаги масалани қарашдан бошладик:

$$M(x,0) = f_1(x) = \begin{cases} M_1 & \text{агар } 0 < x < l, \\ M_2 & \text{агар } x > l. \end{cases}$$

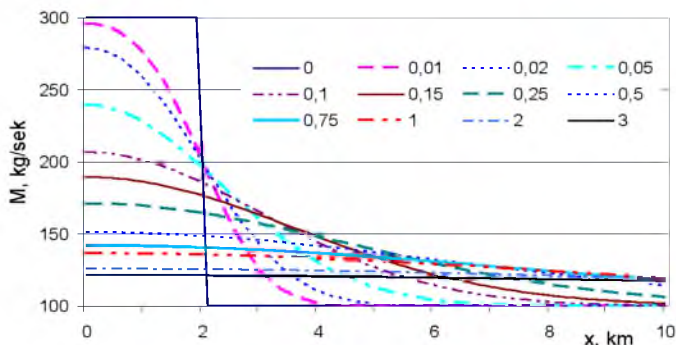
Масаланинг ечими қуйидагича бўлди:

$$M(x,t) = M_2 + \frac{M_1 - M_2}{2} \left[\Phi\left(\frac{x+l}{2a\sqrt{t}}\right) - \Phi\left(\frac{x-l}{2a\sqrt{t}}\right) \right].$$

Босим ўзгаришларини топиш учун сонли усулдан фойдаланилди:

$$p_i^n = p_i^{n-1} - \frac{c^2 \tau}{2fh} (M_{i+1}^n - M_i^n + M_{i+1}^{n-1} - M_i^{n-1}).$$

M_i^n (7-расм) ва p_i^n ларнинг маълум қийматларида газ оқими тезлиги қиймати $w_i^n = c^2 M_i^n / (fp_i^n)$ формула бўйича аниқланди.



7-расм. Бошланғич масса сарфининг $x \in (0; 2)$ км да $M_1 = 300$ кг/с ва $x > 2$ км да $M_2 = 100$ кг/с ҳолидан янги масса сарфи 125 кг/с га ўтишнинг турли вақтларида масса сарфи эгриликлари

Биринчи параграфда келтирилган умумий ечимни бошқа масалаларга ҳам татбиқ этиш мумкинлиги 4.4-параграфда келтирилган.

Бошланғич тақсимланишда масса сарфи манбасининг мавжудлиги ҳақидаги масалада манба Диракнинг дельта-функцияси орқали $M(x, 0) = \delta(x - x_0)$ ифодаланди ва ечим қуйидаги кўринишда олинди:

$$M(x, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \left(e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4a^2 t}} - e^{-\frac{(x+x_0)^2}{4a^2 t}} \right).$$

Босимнинг бошланғич тақсимланиши $p(x, 0) = p_0 - \gamma x$ чизиқли қонунга бўйсунган ҳолдаги масаланинг ечими олинди.

$$p(x, t) = p_1 - p_0 - (p_1 - \gamma x) \Phi\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right) + \frac{2a\gamma\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4a^2 t}},$$

бу ерда γ масса сарфи, қувурнинг гидравлик ва камсикилувчан муҳит зичлиги кўрсаткичлари билан аниқланади.

Газ ва суюқлик масса сарфининг бошланғич тақсимоти чизиқли қонунга бўйсунуши масаласи $\frac{\partial p}{\partial x} + 2a[M_0 - m(x - x_0)] = 0$ тенгламага келтирилди ва ечилди. Бу ерда $M_0 - x_0$ координатагача қисмдаги масса сарфи; m – қувур қисмида масса сарфининг масофа бўйича камайиш коэффиценти.

Ушбу уч масалада етишмайдиган катталиклар сонли усулда топилиши мумкин.

ХУЛОСА

Қувур чизиқли қисмининг газодинамик ҳолатининг хусусиятлари чизиқли ва чизиқли бўлмаган моделлари доирасида ўрганиш асносида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Газ ва суюқликларни қувур орқали узатиш усулининг назарий ва тажрибавий асослари таҳлил қилинди ва уларнинг асосида тадқиқотнинг мақсади ва вазифаларини шакллантирилди.

2. “Қисқа” қувур яқинлашуви доирасида газ қувури чизиқли қисми охирларида масса сарфининг сакраб ўзгаришлари ҳақидаги масала Фурье

усулида ечилди. Масса сарфи ўзгаришларининг умумий ҳолда, босим ва тезликнинг хусусий ҳолларда даврий характери очиб берилди ва қисмда аниқ бир ўртача босимгача етиш учун газ қамашнинг давомийлигини топиш учун тақрибий формула ишлаб чиқилди.

3. Н.Е.Жуковскийнинг газнинг оқиб чиқиши тезлигига доир формуласи асосида қувурнинг элементар қисқа қисмга газни қамаш ва қисмдан газ оқиб чиқиши ҳақидаги масалалар характеристикалар усулида ечилди. Вақтнинг катта қийматларида газ масса сарфи ва тезлиги нолга интилиб, босим эса қисм билан контактда бўлган муҳитнинг босими қийматига экспоненциал қонун билан яқинлашиши аниқланди.

4. Узун газ қувури чегараларида масса сарфининг сакраб ўзгаришларида қувур элементар қисмининг газодинамик ҳолати масаласининг ечими Фурье усулида олинди. Олинган ечим кам сиқилувчан суюқлик ва ўта сиқилувчан газларнинг ламинар оқими режимида аниқ ечимни ва ривожланган турбулент оқим режимида тақрибий ечимини ташкил этади. Газ инерция кучларини ҳисобга олмаслик газ қувурида импульс сакрашларининг тез сўнишига олиб келиши исботланди.

5. Югурувчи тўлқинлар ҳолати ва Даламбер формуласини татбиқ этиш билан қаршилиқ кучининг квадратик қонунини ҳисобга олган ҳолда гидродинамик тезлик бўйича газ қувури чизиқли қисми ҳақидаги масаланинг аналитик ечими қурилди. Газ тезлигига доир маълумотлардан фойдаланиб босим ва зичликка нисбатан масалани сонли ечиш учун алгоритм ишлаб чиқилди. Кириш тезлиги бошқа ўзгармас ва даврий қийматга оний ўтиши ҳақидаги масалаларнинг сонли ечимлари қурилди.

6. Координата ўқининг мусбат ярми учун суюқлик ва газларни қувур орқали узатиш тенгламаларининг Даламбер формуласидан фойдаланиб, киришдаги ўзгармас чегаравий шарт учун умумий ечими қурилди. Ўтиш режими, масса сарфининг Хэвисайд ва Дирак функциялари билан ифодаланадиган бошланғич узлукли тақсимотида доир хусусий масалаларнинг ечимлари топилди.

7. Ҳисоб ишларида ечимлардаги хатолик интегралли қийматини топиш учун юқори аниқликдаги аппроксимацион формуладан, қолган кўрсаткичларни аниқлаш учун эса сонли усуллардан фойдаланилди. Сонли натижалар изолиниялар майдони, қувур узунлиги ва вақт бўйича графиклар кўринишида келтирилди.

8. Диссертациянинг натижаларидан амалий грантни бажариш жараёнида ва амалий мақсадларда фойдаланилган, натижада қурилма ва газ қувурлари ишончилиги 20% оширилган, энергия сарфи 6%га камайтирилган, ҳисоблашларнинг вақти 15-20% га қисқартирилган ва аниқлиги 12% орттирилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ
МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

АНДИЖАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

АХМАДЖОНОВ САРВАРБЕК СОДИКОВИЧ

**ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ И
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ В ГАЗОПРОВОДАХ**

01.02.05 – Механика жидкости и газа

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

Андижан – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2020.2.PhD/T1047.

Диссертация выполнена в Андижанском машиностроительном институте.

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

Научный руководитель: Хужаев Исматулла Кушаевич
Доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Наврузов Куралбай
доктор физико-математических наук, профессор
Жумаев Журабек
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: Самаркандский государственный университет

Защита диссертации состоится «16» март 2022 г. в 14 часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений. (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 33, зал заседаний-1. Тел.(99871) 262-71-52; факс: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института механики и сейсмической стойкости сооружений (зарегистрирована за №10). (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурман йули, 33. Тел.(99871) 262-71-32).

Автореферат диссертации разослан «25»февраль 2022 года.
(реестр Протокола рассылки № 1 от «25»февраль 2022 года.)



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

М.К. Усаров
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., с.н.с.

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире непрерывное развитие нефтяной и газовой промышленности, техники и технологий тесно связано с процессами транспортировки различных сред и передачи тепловой и механической энергии в короткие и длинные расстояния. В частности, согласно сведениям компании British Petroleum по статистике мировой энергетики в 2020 году “объем потребления газа в мире возрос на 78 млрд. куб. м или на 2.5%. Заметное увеличение его отмечено в США (27 млрд. куб. м) и Китае (24 млрд. куб. м)”¹. Производство и доставка к потребителю такого объема горючего газа требуют развития сети трубопроводов на основе инновационных идей. Такое же суждение уместно для установок для транспортировки нефти и нефтепродуктов, передачи тепловой и механической энергии. С этой точки зрения становятся актуальными проблемами разработка новых и совершенствование существующих математических моделей и применение их в производство.

В мире последние годы большое внимание обращают математическому моделированию транспортировке различных веществ длинными и короткими трубопроводами, и развитие этого направления происходит за счет учета дополнительных силовых и энергетических факторов. В частности, большое внимание уделено нестационарным процессам со скачкообразным изменением давления в отдельных элементах сети трубопроводов, обусловленные режимом работы силовых устройств (компрессоров и насосов), подключения и отключения потребителей, утечкой и резким изменением объема подачи и отбора целевого продукта. Такие изменения приводят к образованию нестационарных возмущений, высоких нагрузок в сети и в результате выходят из строя силовые установки, теряется целостность и надежность трубопроводов. Одним из основных требований на сегодняшний день является полный учет внутренних и внешних факторов при разработке математических и численных моделей систем трубопроводов для таких переходных процессов.

В нашей республике проводятся широкомасштабные мероприятия по непрерывному обеспечению потребителей природным газом, нефтью и другими целевыми продуктами в необходимом количестве. В Стратегии по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 гг. определены такие задачи, как «... дальнейшая модернизация и диверсификация промышленности; ... уменьшить расход энергии и ресурсов в экономике, широко внедрять в производство энергосберегающих технологий ...»². В этом аспекте особое внимание требуется уделить усовершенствованию и внедрению в практику математических моделей объектов, связанных с

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

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

проектированием и мониторингом состояния сложных гидравлических сетей, которые имеют важное значение для различных отраслей экономики.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениями Президента Республики Узбекистан № ПП-3107 от 30 июня 2017 года «О мерах усовершенствования системы управления нефтегазовой отрасли» и №ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов» и другими нормативно-правовыми документами, принятыми в этой области деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Математика, механика и информатика».

Степень изученности проблемы. Транспортировка разных жидкостей и газов, передача механической и тепловой энергии с помощью трубопроводов по своей сути входят в состав внутренних задач гидродинамики. При формировании и развитии их особые места занимают работы Никурадзе и Н.Е. Жуковского, посвященные изучению закономерностей сопротивления трубопроводов круглого сечения и распространения ударных волн в водопроводах. В частности, предложенная Н.Е. Жуковским квазиодномерная модель до сегодняшнего дня не теряет свою актуальность и с введением соответствующих изменений адаптируется к современным задачам. Большая заслуга в изучении функционирования системы газопроводов и распространения в них ударных волн таких ученых, как Л.С.Лейбензон, И.А.Чарный, В.П.Юфин, А.А.Ионин, Л.В.Шухов, Э.А.Бондарев, Э.В.Галиакбарова, Е.В.Груничева, Н.Н.Ермолаева, В.С.Кулик, Г.И.Курбатова, К.Ф.Синьков, Hang Zhang, J.Szoplik, Maciej Chaczykowski, M.Guillyn, M.Carlos, Atlas V. Akhmetzyanov и другие.

По направлению трубопроводной транспортировки различных сред в нашей республике занимались Дж.Ф.Файзуллаев, К.Ш.Латипов, В.К.Мукук, А.А.Хамидов, Ж.Акилов, Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Р.Садуллаев, И.К.Хужаев, О.Ш.Бозоров, М.Маматкулов, О.М.Арифжанов, С.И.Худайкулов, А.М.Фатхуллаев, У.У.Жонкobilов, М.К.Махкамов, Х.А.Мамадалиев, Ш.К.Болтибаев и др., которые получили значимые результаты, относящиеся сетям трубопроводов и их элементарных участков.

Согласно требованиям времени развиваются и усовершенствуются системы трубопроводов, применяемых в стационарных и мобильных объектах. Проводятся широкомасштабные работы по уменьшению их энерго- и ресурсозатрат, по увеличению их надежности. Настоящая диссертация также входит в список работ по этому направлению.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках плана научно-исследовательских работ лаборатории “Механика жидкости, газа и систем гидроприводов” Института механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз в 2019-2021 гг.

Цель исследования – усовершенствование методов решения линейных и нелинейных задач о функционировании элементарного участка газопровода и распространения в них волн в приближении короткого и длинного трубопроводов.

Задачи исследования:

провести анализ теоретических основ и методов расчета элементарных участков и сети трубопроводов;

получить решения задач об изменении массового расхода в концах элементарного участка в рамках короткого и длинного трубопровода и на их основе провести вычислительный эксперимент;

на основе гипотезы Н.Е. Жуковского об ограниченности скорости истечения газа сформулировать и решить задач опрессовки (проверки пригодности участка к эксплуатации);

разработать метод решения задач, учитывающие локальной составляющей силы инерции и квадратичный закон сопротивления;

формирование задач перехода в полуограниченных газопроводах и разработать способы их решения.

Объектом исследования являются математические модели функционирования магистральных газопроводов и процессов распространения волн в них.

Предметом исследования являются газодинамические изменения, протекающие на элементарном участке газопровода.

Методы исследования. При проведении исследования пользовались методами математического моделирования, аналитическими и численными методами решения обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных, методами технологии визуализации численных результатов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

формированы газодинамические задачи о переходных процессах с изменением массового расхода газа в концах участка в приближениях коротких и длинных газопроводов, для решения которых разработан метод аналитического решения на основе метод Фурье;

на основе метода характеристик разработан метод решения нелинейной задачи о газодинамическом состоянии короткого газопровода при граничных условиях изменения массового расхода и использовании формулы ограниченной скорости истечения газа Н.А.Жуковского;

на основе опорного решения для бегущих волн и решения Даламбера построено аналитическое решение задачи относительно скорости газа при распространении волн с учетом квадратичного закона сопротивления;

построены аналитические решения задач о переходе из одного режима к другому массовому расходу газа в полубесконечном газопроводе при различных начальных условиях, в т.ч. с привлечением функции Хэвисайда, дельта-функции Дирака и линейной функции;

разработан ряд численных алгоритмов, позволяющие определить полей показателей на основе аналитического решения по конкретному показателю, и исследованы особенности распространения волн уплотнения и разряжения.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны способы определения скачков давления в переходных процессах;

предложен способ определения рабочей длины, диаметра и толщины газопровода при заданном входном давлении газа;

получены формулы для определения времени (продолжительности) закачки и выпуска газа из элементарного участка в зависимости от требуемых показателей давления.

Достоверность результатов исследования обосновывается тем, что в использованных уравнениях и условиях строго выполнены законы сохранения импульса и массы, примененные численные методы обеспечивали необходимую точность и результаты вычислений соответствуют природе изучаемых процессов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в разработке методики совместного использования аналитических и численных методов решения ряда задач.

Практическая значимость результатов исследования выражается возможным применением их в целях уменьшения затрат энергии и увеличения надежности сети газопроводов.

Внедрение результатов исследования. Полученные на основе разработки линейных и нелинейных моделей движения газа и распространения импульса в трубопроводах результаты:

Применены при выполнении прикладного гранта ФА-Атех-2018-414 (Справка АН РУз №2/1255-3037 от 4 ноября 2021 г.). В результате достигнуто построение модели ламинарного и турбулентного течений многофазных сред при различных концентрациях твердых включений и уменьшение энергетических затрат на 6%.

использованы ООО «Universal elegant lyuks» для определения максимального и минимального значений давления, образующихся в процессе транспортировки газа, а также диаметра и толщины трубопровода (Справка АО «Узбекистон миллий электр тармоълари» №01-04-28/4594 от 20 декабря 2021 г.). В результате надежность устройств увеличена на 20%, затрата энергии уменьшена на 6%;

применены Андижанским городским филиалом «Худудгаз Андижон» для точного определения скачков давления в газопроводах (Справка АО «Узбекистон миллий электр тармоылари» №01-04-28/4594 от 20 декабря 2021 г). В результате время, затрачиваемое на расчеты, сокращено на 15-20%, увеличена точность расчетов на 12%, достигнута надежность устройств.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы обсуждались на 7 международных и 2 республиканских научных конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 21 научные работы, из них 9 журнальных статей, в том числе 3 в иностранных (из них 2 в изданиях Scopus) и 6 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. Получены 3 свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении 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 и сведения об опубликованных работах и о структуре диссертации.

Первая глава диссертационной работы **«Состояние изученности проблем трубопроводной транспортировки сред и распространения волн возмущений в трубопроводах»** состоит из трех параграфов.

В параграфе 1.1 проанализированы литературные источники по теоретическим основам использования трубопроводов.

Обсуждены особенности движения твердого тела и жидкости, уравнения сохранения массы и импульса, тензора напряжения для ньютоновских жидкостей, которые служили для обоснования уравнений Навье-Стокса. Приведены варианты использования уравнений Навье-Стокса в системах ортогональных координат и в упрощенных вариантах. Проанализированы работы Д.Андерсона, Ю.П.Коротаева, В.Е.Селезнева, А.З.Миркина, И.О.Протодьяконова, В.Ф.Новоселова, Giulio Guandalini, Aline Barbosa Figueiredo, Yu.D.Zemenkov, Д.Ф.Файзуллаева, З.М.Маликова, а также ряд работ из журналов серии Web of Scince и отечественных ученых.

В параграфе 1.2 обсуждаются структура, функции, гидродинамические и энергетические режимы и особенности других показателей сети трубопроводов. Анализированы работы Д.Н.Попова, Е.В.Сенновой, А.Р.Акбасова, А.К.Николаева, Г.П.Коминой, Г.И.Курбатовой, П.С.Куниной, Shailesh Chandraa, Peng Shanbi, И.К.Хужаева и других, посвященные положениям о пяти гидродинамических режимах течения, о проблемах развития и разработке методов решения задач магистральных газопроводов и распределительных сетей.

В параграфе 1.3 анализированы литературные источники по транспортировке газа, распространению скачков импульса и давления. Произвольное изменение одного из показателей при трубопроводной транспортировке газа и жидкостей приводит к распространению возмущений во всех линейных элементах сети трубопроводов. Ряд работ Н.Е.Жуковского, И.А.Чарного, В.В.Грачева, В.С.Кулика, С.А.Бобровского, А.В.Адоевского, Э.А.Бондарева, А.Д.Тевяшева, Р.Садуллаева и их учеников посвящен распространению возмущений давления в трубопроводах. В конце данного параграфа разъяснены особенности подходов короткого и длинного трубопровода. Обсуждены вопросы образования и распространения скачков газодинамических показателей на элементарных длинном и коротком участках.

На основе анализа ситуации по исследованию проблемы и текущих проблем транспортировки газов по трубопроводу сформированы цели и задачи исследования.

Вторая глава диссертационной работы **«Исследование распространения скачков массового расхода идеального газа в коротком трубопроводе методами Фурье и характеристик»** состоит из двух параграфов.

В параграфе 2.1 сформирована математическая модель задачи об изменениях массового расхода в начале и конце линейного участка в приближении «короткого» трубопровода, т.е. когда градиент давления формируется только локальной составляющей силы инерции газа и соответствующая задача решена аналитически.

Транспортировка идеальных газа и жидкости по короткому горизонтальному трубопроводу в изотермическом режиме описана укороченными уравнениями Н.Е. Жуковского:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial t}, \quad -\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}. \quad (1)$$

Здесь и далее p, ρ, w – средние давление, плотность и скорость транспортируемой среды в сечении x в момент времени t ; $D, f = \pi D^2 / 4$ – диаметр и площадь поперечного сечения трубопровода; c – скорость малых возмущений давления в системе среда-труба принимали в виде

$c = \left(\frac{\rho_0}{k_{жс}} + \frac{2R_0\rho_0}{E\delta} \right)^{-1/2}$, где ρ_0 – плотность невозмущенной жидкости; $E, k_{жс}$ – модуль упругости материала трубы и транспортируемой среды; R_0 – внутренний радиус трубы в невозмущенном состоянии; δ – толщина стенки круглой трубы.

Данная система уравнений линеаризована введением массового расхода $M = \rho wf$ и представлена в виде гиперболического уравнения относительно массового расхода:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Начальными и граничными условиями служат $M(x,0) = M_0 = const$, $\frac{\partial M(x,0)}{\partial t} = 0$, при $0 \leq x \leq l$, $t < 0$; $M(0,t) = M_K = const$, $M(l,t) = M_Ч = const$ при $t \geq 0$, где M_K и $M_Ч$ – значения массового расхода в начале и конце участка. Для массового расхода пришли к задаче Дирихле, а для давления – к задаче Неймана.

Решение задачи относительно массового расхода в виде суммы стационарной и нестационарной частей найдено методом разделения переменных.

Получено периодическое решение задачи по массовому расходу:

$$M(x,t) = M_K + \frac{x}{l}(M_Ч - M_K) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos \frac{\pi nct}{l} \sin \frac{\pi nx}{l}. \quad (3)$$

Для давления было получено следующее решение:

$$p(x,t) = p_0 + \frac{M_K - M_Ч}{lf} c^2 t - \frac{c}{f} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{\pi nct}{l} \cos \frac{\pi nx}{l}, \quad (4)$$

где $b_n = \frac{2}{\pi n} \left\{ \left[(-1)^n - 1 \right] (M_K - M_0) + (-1)^n (M_Ч - M_K) \right\}$.

Скорость малосжимаемой среды вычисляется по формуле $w(x,t) = \frac{c^2 M(x,t)}{f p(x,t)}$, сверхсжимаемой среды – по формуле $w(x,t) = \frac{ZRT M(x,t)}{f p(x,t)}$, где Z, R, T – коэффициент сверхсжимаемости газа, приведенная газовая постоянная и температура газа.

Расчеты проводили для постоянных: $R = 528 \text{ Ж} / (K \cdot \text{кг})$, $c = 400 \text{ м} / \text{с}$, $D = 0.992 \text{ м}$, $T = 297.15 \text{ К}$, $z = 0.920$, $l = 0.5, 1, 2, 5, 10 \text{ км}$, варьируя массовые расходы и начальное давления участка. В случае $p_0 = 0.1 \text{ МПа}$, $M_0 = M_Ч = 0 \text{ кг} / \text{с}$ результаты, полученные при массовом расходе на входе $M_K = 250 \text{ кг} / \text{с}$, показаны на рис. 1.

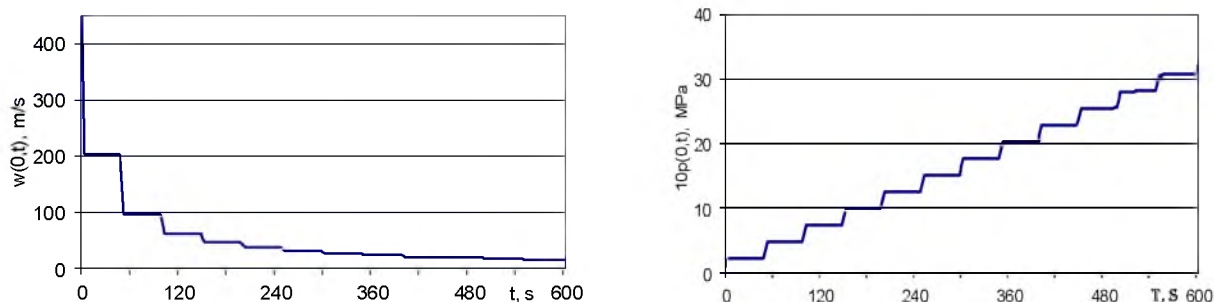


Рис. 1. Изменения скорости и давления газа на входе в участок по времени при закачке газа. $l = 10,0$ км, $p_0 = 0,1$ МПа, $M_0 = M_q = 0$ кг/с, $M_k = 250$ кг/с

В параграфе 2.2, выражая скорости истечения и закачки газа в участок через штуцер по формуле Н.Е. Жуковского об ограниченной скорости истечения газа, сформулирована и решена задача методом характеристик.

В области $D = \{(x,t) : 0 < x < l, 0 < t < T\}$ при моделировании процесса использованы следующие уравнения:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{c^2}{f} \frac{\partial M}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{f} \frac{\partial M}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Начальными и граничными условиями служат $p(x,0) = p_0(x)$, $M(x,0) = M_0(x)$, $0 \leq x \leq l$, $p_H(t) - p(0,t) = \alpha M(0,t)$, $0 \leq t \leq T$, $\partial p(l,t)/\partial x = \varphi(t)$, $0 \leq t \leq T$, где $\alpha = c/s$ (s – площадь сечения штуцера). С введением аналогов бегущих волн $u(x,t) = p(x,t) + \frac{c}{f} M(x,t)$ и $v(x,t) = p(x,t) - \frac{c}{f} M(x,t)$ система (5) приведена к системе уравнений:

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

Начальные и граничные условия примут вид $u(x,0) = \varphi_1(x)$, $v(x,0) = \varphi_2(x)$, $0 \leq x \leq l$, $K_1 u(0,t) = K_2(0,t) + p_H(t)$, $\frac{\partial u(l,t)}{\partial x} + \frac{\partial v(l,t)}{\partial x} = 2\varphi(t)$, $0 \leq t \leq T$, где $\varphi_1(x) = p_0(x) + \frac{c}{f} M_0(x)$, $\varphi_2(x) = p_0(x) - \frac{c}{f} M_0(x)$, $K_1(x) = \frac{\alpha f}{2c} + \frac{1}{2}$, $K_2(x) = \frac{\alpha f}{2c} - \frac{1}{2}$.

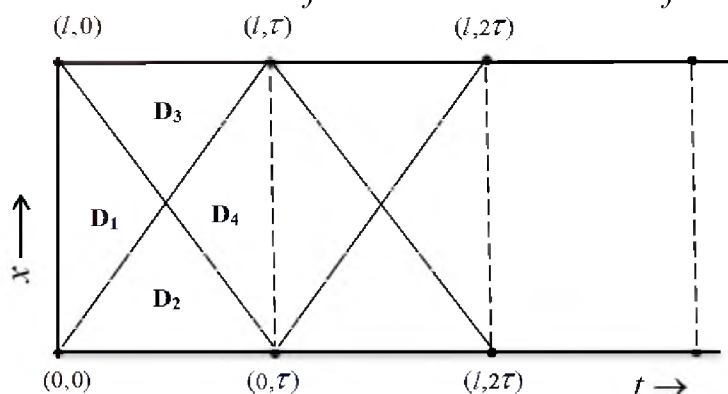


Рис. 2. Разделение области расчета на временные полосы и подобласти D_1, D_2, D_3 и D_4

В промежутке $t \in [0, \tau]$ ($\tau = l/c$) методом характеристик получены решения относительно вспомогательных функций $u(x,t)$ и $v(x,t)$. Разработан алгоритм использования этих решений для последующих временных полос.

Полученные решения

использовали для конкретной задачи $p_H(t) = p_{at}$, $\alpha = c/s$, $M(l, t) = 0$. Это – истечение газа из входного сечения через штуцер с площадью s при закрытом выходном сечении. Для начальных условий $M(x, 0) = 0$, $p(x, 0) = p_0 (> p_{at})$ было получено решение, соответствующее интервалу $(0, \tau]$, и построены рекуррентные соотношения для времени $n\tau$:

$$p_n = p(x, n\tau) = \frac{p(x, (n-1)\tau) + kp_H}{1+k}, \quad M_n = M(x, n\tau) = \frac{1}{2cK_1} [p_H - p(x, (n-1)\tau)].$$

На основе этих формул для $k = s/f$ определили экспоненциальные законы изменения показателей во времени:

$$p_n = (p_0 - p_H)e^{-n\ln(1+k)} + p_H, \quad M_n = (p_H - p_0)e^{-n\ln(1+k)}, \quad w_n = \frac{4ck}{1 + \frac{p_H}{p_H - p_0} e^{-n\ln(1+k)}}.$$

На рисунках 3 и 4 приведены примеры результатов, полученных на основе этих формул.

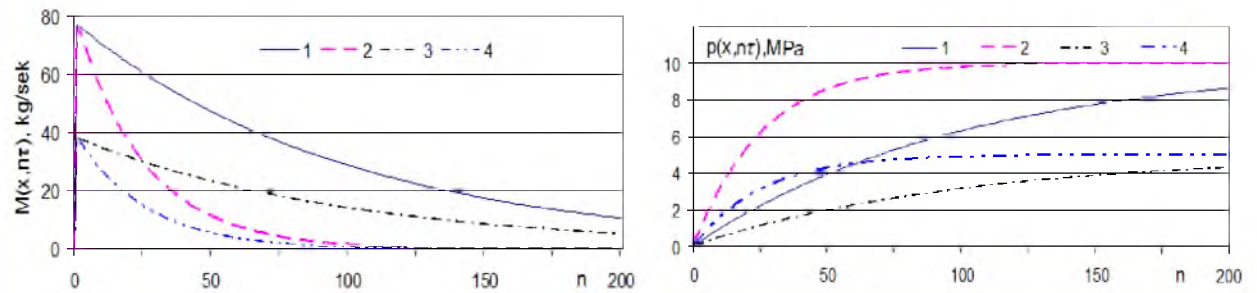


Рис. 3. Изменения массового расхода и давления газа в первых двести шагах $\tau = l/c$ при закачке газа под постоянным давлением.

1 – $p_H = 10$ МПа, $k = 0.01$; 2 – $p_H = 10$ МПа, $k = 0.04$;

3 – $p_H = 5$ МПа, $k = 0.01$; 4 – $p_H = 5$ МПа, $k = 0.04$

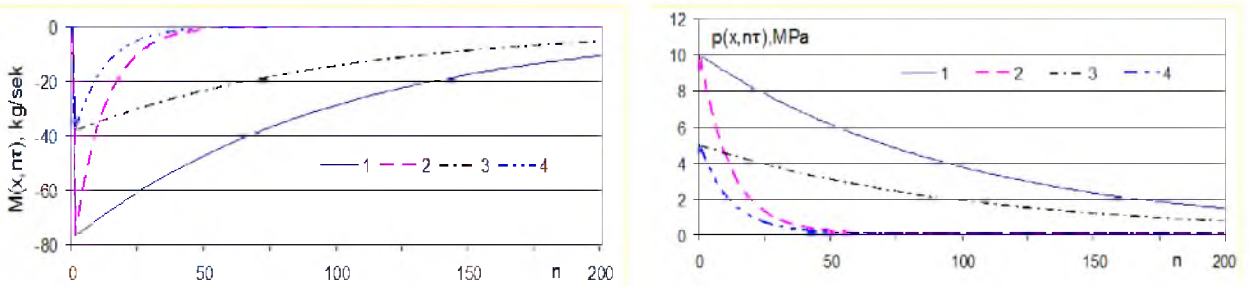


Рис. 4. Изменения массового расхода и давления газа в первых двести шагах $\tau = l/c$ при истечении газа из участка.

1 – $p_0 = 10$ МПа, $k = 0.01$; 2 – $p_0 = 10$ МПа, $k = 0.09$;

3 – $p_0 = 5$ МПа, $k = 0.01$; 4 – $p_0 = 5$ МПа, $k = 0.09$

Третья глава «Решения задач трубопроводного транспорта газа в рамках подхода длинного трубопровода» состоит из двух параграфов. В этом подходе градиент давления выражается только силой трения.

В первом параграфе главы рассматривается задача перехода входного массового расхода на M_K и выходного – на M_C при однородном начальном массовом расходе M_0 по длине l трубы. Линеаризованные уравнения приняты в виде

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2a}{f} M = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{f}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

где $2a = \lambda w_* / (2D)$ – постоянная величина.

Построено уравнение $\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{c^2}{2a} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$ относительно массового расхода, которое решено методом Фурье:

$$M(x,t) = M_K + (M_C - M_K) \frac{x}{l} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) \sin \frac{\pi n x}{l},$$

$$a_n = \frac{2}{\pi n} \left\{ [(-1)^n - 1] (M_0 - M_K) - (-1)^n (M_C - M_K) \right\}.$$

На основе этих выражений из (6) получено решение по давлению:

$$p(x,t) = p_K + \frac{x}{l} (p_C - p_K) - \frac{c^2}{f} \frac{M_C - M_K}{l} t -$$

$$- \frac{2a}{f} \left(M_K x + \frac{M_C - M_K}{2l} x^2 \right) + \frac{2a}{f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n l}{\pi n} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 c^2}{2al^2} t\right) \cos \frac{\pi n x}{l}.$$

Показаны пути использования решений для мало- и сверхсжимаемых сред. Приведены и обсуждены графики, полученные для трех вариантов закрытия граничных сечений.

В параграфе 3.2 получено аналитическое решение задачи по скорости газа в полуограниченном газопроводе при совместном учете локальной составляющей силы инерции и квадратичного закона сопротивления в уравнениях в изотермическом режиме, а для определения поле давления разработан численный метод.

Процесс моделировали следующими уравнениями:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \varepsilon \rho w^2, \quad -\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho w}{\partial x}, \quad (7)$$

где $\varepsilon = \lambda/2D$ – параметр силы сопротивления в законе Дарси-Вейсбаха.

Была поставлена следующая задача: $w(0,t) = \mu(t)$, $w(\infty,t) \rightarrow 0$, $w(x,0) = \phi(x)$, $\partial w(x,0)/\partial t = \psi(x)$.

С учетом уравнения состояния реального газа $p = c^2 \rho$ ($c^2 = ZRT$) и с введением новой искомой функции $\varphi = \ln(\rho/\rho_*)$ (ρ_* – характерная плотность газа) система уравнений (7) приведена к виду:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\varepsilon w^2, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0.$$

Построены уравнения для бегущих волн $A = w + c\varphi$, и $B = w - c\varphi$. В новых уравнениях ввели субстанциональную производную и, построив уравнение относительно $w(x,t) = [A(\eta,t) + B(\xi,t)]/2$, из него получили опорное решение $w = w^0 / \left(1 + \frac{\varepsilon x}{c} w^0\right)$.

Для определение значения w^0 обратились к решению Даламбера:

$$w^0(x,t) = \frac{\Phi(x+ct) - \Phi(x-ct)}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_{x-ct}^{x+ct} \Psi(\alpha) d\alpha,$$

где Φ и Ψ – значения искомой функции и ее производной по времени при $t = 0$.

Чтобы обеспечить нулевое значение искомой функции при $x = 0$, необходимо принять

$$\Phi(x) = \begin{cases} \phi(x) & \text{при } x > 0 \\ -\phi(x) & \text{при } x < 0 \end{cases} \quad \text{и} \quad \Psi(x) = \begin{cases} \psi(x) & \text{при } x > 0 \\ -\psi(x) & \text{при } x < 0 \end{cases}.$$

При новом значении скорости $\mu(t)$ в сечении $x = 0$ формируется задача по $w^0(x,t)$. Подставив это значение w^0 в опорное решение, получен окончательный результат для скорости:

$$w(x,t) = \begin{cases} \frac{\mu\left(t - \frac{x}{c}\right) + \frac{1}{2}[\phi(x+ct) - \phi(x-ct)] + \frac{1}{2} \int_{ct-x}^{x+ct} \psi(\alpha) d\alpha}{1 + \frac{\varepsilon x}{c} \left\{ \mu\left(t - \frac{x}{c}\right) + \frac{1}{2}[\phi(x+ct) - \phi(x-ct)] + \frac{1}{2} \int_{ct-x}^{x+ct} \psi(\alpha) d\alpha \right\}} & \text{при } x \leq tc, \\ \frac{\frac{1}{2}[\phi(x+ct) - \phi(x-ct)] + \frac{1}{2} \int_{x-ct}^{x+ct} \psi(\alpha) d\alpha}{1 + \frac{\varepsilon x}{c} \left\{ \frac{1}{2}[\phi(x+ct) - \phi(x-ct)] + \frac{1}{2} \int_{x-ct}^{x+ct} \psi(\alpha) d\alpha \right\}} & \text{при } x > tc. \end{cases}$$

Для определения распространения возмущений давления и плотности применяли численный метод. Переход к дискретным координатам осуществляется так, чтобы скачок импульса находился в расчетном узле. Если шаг по пространству составляет h , то шаг по времени будет $\tau = h/c$.

Для данных $M(t) = 0 = const$, $\psi(x) = 0$, $\phi(x) = 0$, $\varphi(x,0) = 0$ разработана программа и для различных значений U , ε получены численные результаты.

При достижении волны импульса узла с координатой $x = nh$ скорость газа составляет $w_n^n = \frac{U}{1 + (\varepsilon nh/c)U}$. Значение вспомогательной функции на

фронте волны $\varphi_n^n = \tau w_n^n / h$ определили с учетом того, что газ остается в состоянии покоя в узлах после фронта возмущения. Потенцируя эту

зависимость, были определены значения плотности и давления на фронте волны для n -го временного шага:

$$\rho_n^n = \rho_* \exp(U/(c + \varepsilon nhU)), \quad p_n^n = P \exp(U/(c + \varepsilon nhU)).$$

Методом конечных разностей получена рекуррентная формула для вычисления значения вспомогательной функции в узлах $i = n-1..0$.

$$\varphi_i^n = \varphi_{i+1}^n + \frac{h}{c^2} \left[\frac{w_{i+1}^n - w_{i+1}^{n-1}}{\tau} + \varepsilon (w_{i+1}^n)^2 \right].$$

Здесь учитывали, что возмущение давления перемещается против направления распространения волны импульса.

Вычислив значения w_i^n по приведенной формуле и значения вспомогательной функции φ_i^n маршевым методом, определяются поля скоростей и вспомогательной функции. Плотность, давление и массовый расход газа в сеточных координатах определяются по формулам:

$$\rho_i^n = \rho_* \exp(\varphi_i^n), \quad p_i^n = c^2 \rho_i^n, \quad M_i^n = f \rho_i^n w_i^n.$$

Проводили вычислительный эксперимент для трубопровода с диаметром 1 м, коэффициентом сопротивления 0.01 при $\varepsilon = 0.005 \text{ м}^{-1}$. Рассматривали случай, когда в начале газ покоится, и на входе участка скорость от 0 м/с скачком увеличивается до 20 м/с. Ниже приведены некоторые из полученных результатов.

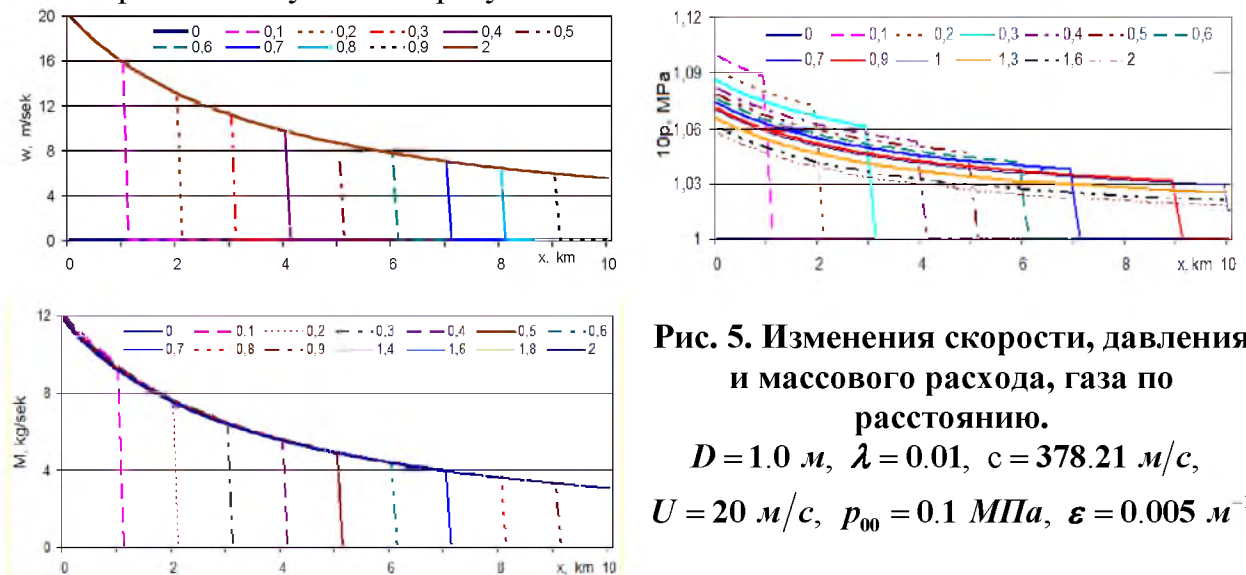


Рис. 5. Изменения скорости, давления и массового расхода, газа по расстоянию.

$$D = 1.0 \text{ м}, \quad \lambda = 0.01, \quad c = 378.21 \text{ м/с},$$

$$U = 20 \text{ м/с}, \quad p_{00} = 0.1 \text{ МПа}, \quad \varepsilon = 0.005 \text{ м}^{-1}$$

Скорость потока по длине убывает гиперболическим законом. На фронте скачка значение скорости составляет: при $tc/l = 0.1$ – 15.8177 м/с, $tc/l = 0.4$ – 9.7199 м/с, при $tc/l = 1$ – 5.4884 м/с.

При $ct/l = 0.0$ массовый расход на входе в участок составляет 12.190 кг/с, при $x = 0.1$ км убывает до 11.264 кг/с. Далее скачком убывает до 0 кг/с. С истечением времени входной массовый расход убывает: при $ct/l = 0.50$ – 11.844 кг/с, а при $ct/l = 1.00$ – 11.746 кг/с, а при $ct/l = 2.00$ – 11.700 м/с.

Четвертая глава «Аналитико-численные методы решения задач о распространении возмущений импульса и давления в полубесконечной трубе» состоит из трех параграфов. В этой главе получены общие и частные решения задачи о динамическом состоянии газа в полубесконечной трубе при новом постоянном значении массового расхода на входе M_1 когда задано начальное распределение $f(x)$ массового расхода при $x \in (0, \infty)$.

Составили уравнение массового расхода в виде $\frac{\partial M}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$, где $a^2 = 2Dc^2/\lambda u_*$. С применением интеграла ошибок $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\mu^2} d\mu$ было получено общее аналитическое решение задачи:

$$M(x,t) = M_1 \left[1 - \Phi \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right) \right] + \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \int_0^{+\infty} f(\xi) \left[e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2 t}} - e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4a^2 t}} \right] d\xi.$$

Решение подставляли в уравнение сохранения импульса и полученное для давление уравнение решали методом конечных разностей

В параграфе 4.2 рассмотрена задача о переходе с одного режима по массовому расходу к другому режиму. Это соответствует переходному процессу от режима с постоянным массовым расходом M_1 к новому

массовому расходу M_2 мгновенно: $f_1(x) = \begin{cases} M_1 & \text{при } x > 0, \\ M_2 & \text{при } x < 0. \end{cases}$

Аналитическое решение этой задачи составило (рис. 6):

$$M(x,t) = \frac{M_2 + M_1}{2} + \frac{M_1 - M_2}{2} \Phi \left(\frac{x}{2a\sqrt{t}} \right).$$

Для вычисления значения интеграла ошибок использовали аппроксимационную формулу из:

$\Phi(x) = 1 - (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5) e^{-x^2} + \varepsilon(x)$, где $t = 1/(1+px)$, $p = 0,3275911$, $a_1 = 0,254829592$, $a_2 = -0,284496736$, $a_3 = 1,421413741$, $a_4 = -1,453152027$, $a_5 = 1,061405429$. Точность такой аппроксимации составляет $|\varepsilon(x)| \leq 1,5 \cdot 10^{-7}$.

Для определения возмущения давления, как в параграфе 3.2, использовали численный метод.

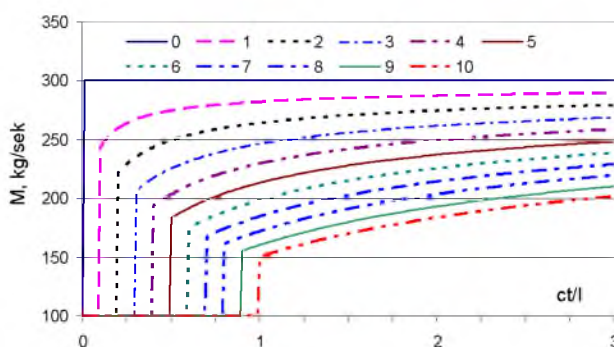


Рис. 6. Изменение массового расхода газа по времени при переходе от массового расхода 100 кг/с к 300 кг/с.

$$l = 10 \text{ км}, \quad D = 1.0 \text{ м}, \quad h = l/1000,$$

$$p(0,0) = 5.6 \text{ МПа}, \quad \lambda = 0.01,$$

$$R = 518.26 \text{ Ж/К}^{-1} \text{ кг}^{-1}, \quad T = 300.0 \text{ К},$$

$$z = 0.92, \quad u_* = 20 \text{ м/с}$$

В параграфе 4.3 рассмотрены задачи, когда начальное распределение массового расхода имело кусочно-постоянный характер. Начнем со случая, когда в начальном распределении массового расхода в отрезке $[0; l]$ существует поток с массовым расходом M_1 , а в остальных частях трубы – с массовым расходом M_2 , т.е.

$$M(x, 0) = f_1(x) = \begin{cases} M_1 & \text{при } 0 < x < l, \\ M_2 & \text{при } x > l. \end{cases}$$

Решение задачи имело вид:

$$M(x, t) = M_2 + \frac{M_1 - M_2}{2} \left[\Phi\left(\frac{x+l}{2a\sqrt{t}}\right) - \Phi\left(\frac{x-l}{2a\sqrt{t}}\right) \right].$$

Для определения изменения давления пользовались численным методом:

$$p_i^n = p_i^{n-1} - \frac{c^2 \tau}{2fh} (M_{i+1}^n - M_i^n + M_{i+1}^{n-1} - M_i^{n-1}).$$

При известных значениях M_i^n (рис.7) и p_i^n значение скорости потока газа определяется по формуле $w_i^n = c^2 M_i^n / (fp_i^n)$.

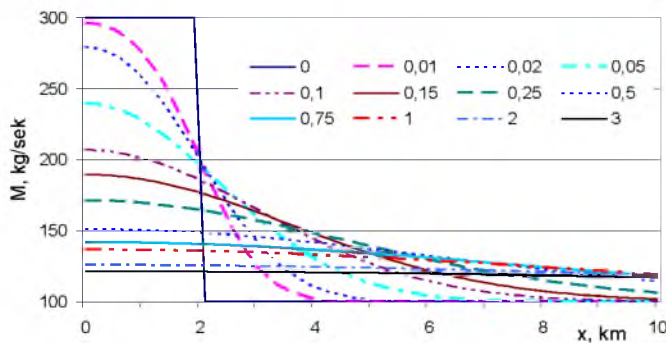


Рис. 7. Профили массового расхода по длине, построенные для случая $M_1 = 300$ кг/с при $x \in (0; 2)$ км и $M_2 = 100$ кг/с при $x > 2$ км под новым входным расходом 125 кг/с

Возможные варианты применения общего решения из параграфа, к другим задачам приведены в параграфе 4.4.

Наличие точечного источника массового расхода в начальном распределении выразили дельта-функцией Дирака $M(x, 0) = \delta(x - x_0)$ и решение задачи получили в виде:

$$M(x, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \left(e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4a^2 t}} - e^{-\frac{(x+x_0)^2}{4a^2 t}} \right).$$

Получено решение задачи для случая линейного начального распределения давления $p(x, 0) = p_0 - \gamma x$:

$$p(x, t) = p_1 - p_0 - (p_1 - \gamma x) \Phi\left(\frac{x}{2a\sqrt{t}}\right) + \frac{2a\gamma\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4a^2 t}}.$$

где γ определяется массовым расходом, гидравлическими показателями трубы и плотностью малосжимаемой среды.

Задача о линейном начальном распределении массового расхода газа и жидкости приведена к уравнению $\frac{\partial p}{\partial x} + 2a[M_0 - m(x - x_0)] = 0$ и решена. Здесь M_0 – массовый расход до точки x_0 ; m – коэффициент уменьшения массового расхода в участке трубопровода по расстоянию.

В этих трех задачах не достающие величины можно определять численным методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе изучения особенностей газодинамического состояния линейного участка газопровода в рамках линеаризованных и нелинейных математических моделей сделаны следующие выводы:

1. Анализированы теоретические и экспериментальные основы трубопроводного способа транспортировки газов и жидкостей, на основе которых сформулированы цель и задачи исследования.

2. В рамках приближения «короткого» трубопровода методом Фурье решена задача о скачкообразных изменениях массового расхода в концах участка. Выявлен периодический характер изменения массового расхода в целом и давления и скорости – в частных случаях и получена приближенная формула для определения продолжительности закачки газа до достижения определенного среднего давления на участке.

3. Методом характеристик решены задачи о закачке газа в элементарный короткий участок и истечения газа из участка согласно формуле Н.Е. Жуковского о скорости истечения газа. Выявлено, что при больших значениях времени массовый расход и скорость газа стремятся к нулю, а давление на участке стремится к значению давления в сообщаемой среде экспоненциальным законом.

4. Методом Фурье получено решение задачи о газодинамическом состоянии элементарного длинного участка газопровода при изменении граничных значений массового расхода скачками. Оно является точным для ламинарного режима течения и приближенным для развитого турбулентного режима течения малосжимаемой жидкости и сверхсжимаемого газа. Доказано, что игнорирование сил инерции газа приводит к быстрому гашению скачков импульса в газопроводе.

5. С привлечением положений бегущих волн и формулы Даламбера получено аналитическое решение задачи об элементарном участке газопровода по гидродинамической скорости газа с учетом квадратичного закона силы сопротивления. Для решения задачи относительно давления и плотности газа разработан численный алгоритм, в котором использовано решение задачи по скорости газа. Получены численные результаты решения задачи о мгновенном переходе входной скорости к новому постоянному и периодическому значению.

6. С использованием формулы Даламбера для положительной полуоси координаты получено общее решение уравнений транспортировки жидкости и газа по трубопроводу при постоянном входном граничном условии. Найдены частные решения задач расхода о переходном режиме, начальных распределений массового разрывного характера, выражающихся функциями Хевисайда и Дирака.

7. Для вычисления значения интеграла ошибок в решениях использовали аппроксимационную формулу высокой точности, а для определения других показателей – численный метод. Представлены численные результаты в виде полей изолиний, графиков по длине трубопровода и по времени.

8. Результаты диссертации использованы при выполнении прикладного гранта и в практических целях, в результате надежность устройств и газопровода увеличена на 20%, затрата энергии уменьшена на 6%, затрачиваемое на расчеты время сокращено на 15-20%, увеличена точность расчетов на 12%.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc. 02/30.12.2019.T/FM.61.01 AWARDING
THE SCIENTIFIC DEGREE AT THE INSTITUTE OF MECHANICS AND
SEISMIC STABILITY OF STRUCTURES**

ANDIJAN MACHINE-BUILDING INSTITUTE

AKHMADJONOV SARVARBEK SODIKOVICH

**LINEAR AND NONLINEAR MODELS OF GAS MOVEMENT AND
PULSE PROPAGATION IN GAS PIPELINES**

01.02.05 – Mechanics of liquid and gas

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

Andijon – 2022

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registred at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of thr Republic of Uzbekistan under number№ B2020.2.PhD/T1047

The dissertation has been prepared in the Andijan Machine-Building Institute.

The absteract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council (www.instmech.uz) and on the information- educational portal "ZiyoNet" at the address (www.ziynet.uz.)

Scientific adviser:

Khujaev Ismatulla

Doctor of Technical Sciences, professor

Official opponents :

Navruzov Kuralbay

Doctor of Physical-Mathematical Sciences, Professor

Jumayev Jorabek

Candidate of Physical-Mathematical Sciences, docent

Leading organization:

Samarkand state university

Defense will take place «16» march 2022 at 14⁰⁰ the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (Address 100125, Tashkent, Durman yuli street, 33, Conference hall – 1. Tel: (99871) 262-71-52; fax: (99871) 262-71-32, e-mail:instmech@academy.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource center of the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (registration number №. 10). (Address: 1000125, Tashkent, st. Durmon Yuli, 33. Tel. (99871) 262-71-52).

Abstract of the dissertation sent out on “25” february 2022y.
(mailing report №. 1 on “25”february 2022 y.)



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

M.K.Usarov
Scientific secretary of Scientific Council
for awarding scientific degrees, doctor of
technic sciences

Z.M.Malikov
Chairman of the council seminar at the
Scientific Council for the awarding
degrees, doctor of technic sciences

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research is to develop improved methods for solving linear and nonlinear problems about the functioning of an elementary section of a gas pipeline and the propagation of waves in them in the approximation of short and long pipelines.

The object of the research work is mathematical models of the functioning of main gas pipelines and the processes of wave propagation in them.

The scientific novelty of the work is as follows:

analytical solutions to problems of transient processes caused by changes in mass flow rate in short and long gas pipelines have been obtained;

on the basis of the method of characteristics, a nonlinear problem of the gas-dynamic state of a short gas pipeline was solved under the boundary conditions of changing the mass flow rate and using the formula for the limited gas outflow rate;

on the basis of the reference solution for traveling waves and the d'Alembert solution, an analytical solution to the problem with respect to the gas velocity during wave propagation is obtained, taking into account the quadratic law;

analytical solutions of the problems of the transition from one mode to another are obtained for the mass flow rate of gas in a semi-infinite gas pipeline under various initial conditions, incl. e using the Heaviside function, the Dirac delta function and the linear function;

a number of numerical algorithm have been developed that make it possible to determine the fields of indicators on the basis of an analytical solution for a specific indicator, and the features of the propagation of waves of compaction and expansion have been studied.

Implementation of research results. The results obtained on the basis of the development of linear and nonlinear models of gas movement and pulse propagation in pipelines:

applied in the implementation of the applied grant "FA-Atech-2018-414" (certificate of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan № 2/1255-3037 November 4, 2021). As a result, the construction of a model of laminar and turbulent flows of multiphase media at various concentrations of solid inclusions and a decrease in energy costs by 6% was achieved;

used by LLC "Universal elegant lyuks" to determine the maximum and minimum pressure values generated during gas transportation, as well as the diameter and thickness of the pipeline (Reference of JSC "Uzbekistan Milli Elektr tarmoqlari" No. 01-04-28/4594 dated December 20, 2021). As a result, the reliability of devices is increased by 20%, energy consumption is reduced by 6%;

applied by the Andijan city branch "Khududgaz Andijon" to accurately determine the pressure surges in gas pipelines (Reference). As a result, the time spent on calculations was reduced by 15-20%, the accuracy of calculations was increased by 12%, and the reliability of the devices was achieved.

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

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I-бўлим (I часть; I part)

1. 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.35-89 (05.00.00; №5).
2. Ахмаджонов С.С., Хужаев И.К. Исследование газодинамического состояния элементарного участка трубопровода на основе уравнений Н.Е. Жуковского // НамМТИ илимий-техника журнали. – Наманган, Том 4 - Махсус сон №2, 2019. – С. 101-110. (05.00.00; №33).
3. Khujayev I., Ahmadjonov S., Khujayev M., Ismailov A. Investigation of the gas-dynamic state of an elementary section of the pipeline based on N.E. Zhukovsky equation // “Clarivate Analytics” International Scientific Journal ISJ Theoretical & Applied Science, Philadelphia, USA. – 2019. – Vol. 78. – Issue 10. – pp. 32-40. <http://www.t-science.org/arxivDOI/2019/10-78/10-78-5.html>. (05.00.00).
4. Khujayev I.K., Bozorov O.Sh., Mamadaliev Kh.A., Aminov H.Kh., Akhmadjonov S.S. Finite-difference method for solving nonlinear equations of traveling waves in main gas pipelines // Проблемы вычислительной и прикладной математики. Ташкент, 2020, №5(29). – С. 95-107.(05.00.00; №23).
5. Khujayev I, Bozorov O, Akhmadjonov S. Investigation of the propagation of waves of sudden change in mass flow rate of fluid and gas in a “short” pipeline approach // Journal of Physics: Conference Series 1441 (2020) 012146 doi:10.1088/1742-6596/1441/1/012146 Pp. 1-13. (Scopus, № 3).
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. - Узбекский журнал Проблемы механики, 2021. №1(30) - С. 65-75 (05.00.00; №5).
7. Akhmadjonov S.S., Mahmudov S.A., Khujayev I.K. Generalization of the riemann method for solving the problem of wave propagation in a semi-infinite as pipeline by a quadratic law of hydraulic resistance // Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent, 2021. Vol. 11. – pp. 25-31. (05.00.00; №25).
8. Ismatulla Khujayev, Sarvarbek Akhmadjonov and Alisher Ismailov “Generalization of the Riemann method for the trunk gas pipelines considering the quadratic law of resistance” E3S Web of Conferences 264, 01013 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126401013>. (Scopus, № 3).
9. Mahkamov M.K. Akhmadjonov S.S. Khujayev I.K. Method of characteristics for solving the problem of gas outflow from an elementary section of a gas pipeline // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research: 2021. Vol. 3, Iss. 1, Article 13. – pp. 84-91. «Uzbekistan Research Online», №31.

II-бўлим (II часть; II part)

10. Хужаев И.К., Ахмаджонов С.С. Математическое моделирование распространения возмущений импульса в трубопроводах // Машинасозлик ишлаб чиқариш ва таълим: муаммолар ва инноватцион ечимлар: Республика илмий-техник анжумани материаллари. 2019 йил 19-20 сентябрь. 2019. – Фаргона: ФарПИ, 2019. – 184-185 б.

11. Ахмаджонов С.С. Применение подхода коротких трубопроводов при моделировании распространения волн уплотнения и разряжения в системе идеальная жидкость-труба // Инноватцион гоёлар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда қўллашнинг замонавий муаммолари: Халқаро илмий-амалий конференция материаллари. 2019 йил 15 апрель. 2019. – Андижон: АДУ, 2019. – 509-511 б.

12. Хужаев И.К., Маматкулова М.М., Ахмаджонов С.С. К решению задачи о функционировании полубесконечного трубопровода при условиях разрывных решений // Инноватцион гоёлар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда қўллашнинг замонавий муаммолари: Халқаро илмий-амалий конференция материаллари. 2019 йил 15 апрель. 2019. – Андижон: АДУ, 2019. – 467-469 б.

13. Хужаев И.К., Ахмаджонов С.С., Шоимов К.М. Исследование распространения импульса в протяженном трубопроводе // Фан ва таълим-тарбиянинг долзарб масалалари: Республика илмий-назарий конференция материаллари. Нукус, 2019. - 4-қисм. – 430-432 б.

14. Хужаев И.К., Ахмаджонов С.С., Мамадалиев Х.А. Способы реализации граничных условий при решении нелинейных уравнений трубопроводного транспорта газа в рамках подхода бегущих волн // Инноватцион гоёлар, ишланмалар амалиётга: муаммолар ва ечимлар: Халқаро илмий-амалий онлайн анжуман материаллари. 2020 йил, 27-28 май. – Андижон: Андижон давлат университети, 2020. – 93-96 б.

15. Khujayev I.Q., Akhmadjonov S.S. Wave propagation, taking into account the quadratic nonlinearity of the hydrodynamic resistance in gases, is in semi-infinite // II Международное книжное издание стран Содружества Независимых Государств «Лучший молодой ученый - 2020». 28 сентября 2020. - г. Нур-Султан, Казахстан, 2020. С. 9-12.

16. Khojaev I.Q., Akhmadjonov S.S., Mahmudov S.A. Linear approach to study the dynamics of gas flow with an abrupt change in mass flow // II Международное книжное издание стран Содружества Независимых Государств «Лучший молодой ученый - 2020». 28 сентября 2020. - г. Нур-Султан, Казахстан, 2020. С. 99-104.

17. Хужаев И.К., Ахмаджонов С.С. Қувурдаги қаршилик квадратик қонунининг газ тезлигига боғлиқлиги // Амалий математика ва ахборот технологияларининг замонавий муаммолари: Халқаро илмий-амалий анжуман тезислар тўплами. 2021 йил 15 апрел. - Бухоро, 2021. – 173-176 б.

18. Ахмаджонов С.С., Махмудов С.А. Задачи о распределении массового расхода в полубесконечной трубе // X Международной научно-

практической конференции «Научные исследования и разработки: новое и актуальное». Россия, г. Ростов-на-Дону, 26 мая 2021 г.–С. 399-403.

19. Хужаев И.К., Ахмаджонов С.С. Программное средство «Расчет распространения волн уплотнения в коротких газопроводах» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 06647. 06.05.2019 г.

20. Хужаев И.К., Ахмаджонов С.С. Программное средство «Программа расчета распространения скачков импульсов в длинных газопроводах» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 06961. 20.08.2019 г.

21. Хужаев И.К., Ахмаджонов С.С, Мамадалиев Х.А. Программное средство «Газодинамического расчета коротких газопроводах при закачке и отбора газа через штуцер» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 11701. 04.06.2021 г.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«Композицион материаллар» илмий журнали
таҳририятида таҳрирдан ўтказилди

Босишга рухсат этилди: 18.02.2022 йил.
Бичими 60x841/16, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулидан босилди.
Шартли босма табоги: 2,75. Адади 100. Буюртма № 39.
Тел (99) 832-99-79; (97) 815-44-54.
Гувоҳнома reestr № 10-3279
«IMPRESS MEDIA» МЧЖ босмаҳонасида чоп этилган.
100031, Тошкент ш., Яккасарой тумани, Қушбеги кўчаси, 6-уй.