

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖА БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2019.T.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ТОШКЕНТ ИРРИГАЦИЯ ВА ҚИШЛОҚ ХЎЖАЛИГИНИ
МЕХАНИЗАЦИЯЛАШ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ**

Комилова Холидахон Мухтаровна

**СУЮҚЛИК ТРАНСПОРТИРОВКА ҚИЛУВЧИ
ҚУВУРЛАРНИНГ ДИНАМИК ҲОЛАТИНИ БАҲОЛАШ
УЧУН МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАР, МЕТОДЛАР ВА
АЛГОРИТМЛАР ИШЛАБ ЧИҚИШ**

**05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи
диссертация ҳимоясиз Scopus халқаро тизимга кирган илмий журналлардаги
мақолалари асосида**

**техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
илмий даражасини бериш бўйича
ТАҚДИМНОМА**

Тошкент – 2021

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
тақдимоти мундарижаси**
**Оглавление презентации диссертации доктора философии (PhD) по
техническим наукам**
**Contents of dissertation presentation of doctor of philosophy (PhD) on
technical sciences**

Комилова Холидахон Мухтаровна

Суюқлик транспортировка қилувчи қувурларнинг динамик ҳолатини
баҳолаш учун математик моделлар, методлар ва алгоритмлар ишлаб
чиқиш 3

Комилова Холидахон Мухтаровна

Разработка математических моделей, методов и алгоритмов для
оценки динамического поведения трубопроводов, транспортирующих
жидкость..... 22

Komilova Kholidakhon Mukhtarovna

Development of mathematical models, methods and algorithms for
assessing the dynamic behavior of pipelines conveying fluid
..... 42

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 45

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖА БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ТОШКЕНТ ИРРИГАЦИЯ ВА ҚИШЛОҚ ХЎЖАЛИГИНИ
МЕХАНИЗАЦИЯЛАШ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ**

Комилова Холидахон Мухтаровна

**СУЮҚЛИК ТРАНСПОРТИРОВКА ҚИЛУВЧИ
ҚУВУРЛАРНИНГ ДИНАМИК ҲОЛАТИНИ БАҲОЛАШ
УЧУН МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАР, МЕТОДЛАР ВА
АЛГОРИТМЛАР ИШЛАБ ЧИҚИШ**

**05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи
диссертация ҳимоясиз Scopus халқаро тизимга кирган илмий журналлардаги
мақолалари асосида**

**техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
илмий даражасини бериш бўйича
ТАҚДИМНОМА**

Тошкент – 2021

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.2.PhD/T1737 рақами билан рўйхатга олинган.

Такдимнома Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институтида бажарилган.

Такдимнома уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб саҳифасида (www.tuit.uz) ва «Ziyonet» Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилди.

Илмий раҳбар:

Худаяров Бахтияр Алимович
техника фанлари доктори

Расмий оппонентлар:

Полатов Асхад Мухамеджонович
Физика-математика фанлари доктори, профессор

Анарова Шахзода Аманбоевна
техника фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот:

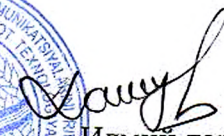
Тошкент давлат техника университети


Такдимнома муҳокамаси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.13/30.12.2019.T.07.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «8» апрел соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент ш., Амир Темур кўчаси, 108. Тел.: (+99871) 238-64-43; факс: (+99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

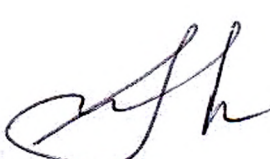
Такдимнома билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (4/2639 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Такдимнома автореферати 2021 йил «26» март куни тарқатилди. (2021 йил «26» феврал даги 5 рақамли реестр баённомаси)




Р.Х.Ҳамдамов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, техника фанлари доктори, профессор


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


Ш.А. Садуллаева
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, физика-математика фанлари доктори

КИРИШ (тақдимотнинг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда нефть ва газни қувур орқали транспортировка қилиш кўплаб давлатларнинг саноати ва ишлаб чиқариш тармоқларининг иқтисодий ривожланишида муҳим аҳамиятга эгаллиги мамлакатлар қувур транспортининг жадал суратларда ривожланишига эҳтиёж кузатилмоқда. Қувур транспортировкаси бошқа кўринишдаги транспортировкалардан ўзининг юқори экологик хавфсизлиги ва маҳсулотларни иқтисодиёт тармоқларининг белгиланган объектларига узлуксиз таъминлаши билан ажралиб туради. Қувурлар эксплуатацияси жараёнида рўй берадиган турли тасодифий авариялар атроф-муҳитга ва/ёки инсонларга катта зарар етказиши мумкин. Шу сабабли иқтисодиёт тармоқлари, жумладан, нефть-газ саноати, қишлоқ ва сув хўжалиги, уй-жой коммунал хўжалиги ва химия саноати тармоқларида кенг қўлланилаётган суюқлик транспортирка қилувчи композицион қувурлар вибрациясини татқиқ қилиш долзарб масалалардан биридир. Дунёнинг ривожланган мамлакатлари, шу жумладан, АҚШ, Канада, Буюк Британия, Германия, Франция, Россия Федерацияси, Хитой, Саудия Арабистони ҳамда Туркия тадқиқотчилари томонидан суюқлик транспортировка қилувчи эластик горизонтал ва вертикал қувурлар, қовушқоқ-эластик композицион қувурларга таъсир этувчи турли факторлар ҳисобга олинган ҳолда уларда содир бўладиган тебранишларни камайтириш ва уларнинг ишончли эксплуатациясини таъминлашга алоҳида эътибор қаратилмоқда

Жаҳонда ёпишқоқ-эластиклик хусусиятига эга композицион қувурлар турғунлиги ва тебраниши жараёнларининг математик моделларини ишлаб чиқиш, аналитик ва сонли ечиш методлари, ҳисоблаш алгоритмлари ҳамда компьютер дастурларини яратиш бўйича кенг қамровли илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу борада, жумладан, бир ва икки фазали суюқлик оқиб ўтаётган қувурлар, ўзгармас ва ўзгарувчан тезликка эга суюқликлар оқиб ўтаётган қувурлар, стационар ва ностационар кучлар ҳамда мужассамлашган массалар таъсири остида қувурлар тебраниши жараёнини таҳлил қилиш ва суюқлик критик тезликларини аниқлаш муҳим тадқиқот мавзулари сифатида қаралади.

Республикамызда нефть-газ саноати, қишлоқ ва сув хўжалиги, уй-жой коммунал хўжалигида мураккаб кўринишдаги муҳандислик композицион ва полимер-композицион қувурлари системасини лойиҳалаш ва барпо этишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...муҳандислик-коммуникация ва ижтимоий инфратузилмаларни ривожлантириш ҳамда модернизация қилиш бўйича мақсадли дастурларни амалга ошириш»¹ вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифани амалга

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

ошириш, жумладан нефть-газ саноати тармоқлари, аҳолини сув билан таъминлаш корхоналари ва гидротехник иншоотларнинг сув чиқариш қувурларининг тебраниш жараёни муаммоларини ҳал этишнинг динамик усуллари, алгоритмлари ва ҳисоблаш дастурларини ишлаб чиқиш муҳим илмий аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» Фармони, 2020 йил 7 майдаги ПҚ-4708-сон «Математика соҳасидаги таълим сифатини ошириш ва илмий-тадқиқотларни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида», 2019 йил 11 ноябрдаги ПҚ-4522-сон “Нефть ва газ геология-қидирув ишларини ташкил этиш ва олиб бориш тизимини такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”, 2017 йил 25 сентябрдаги «Сув объектларини муҳофаза қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида» ПҚ-3286-сон қарорлари ҳамда мазкур фаолиятларга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу илмий тадқиқот муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV. “Математика, механика, иншоотлар сейсמודинамикаси ва информатика” устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммони ўрганилганлик даражаси. Сўнгги йилларда стержен ва цилиндрик қобик кўринишдаги қувурларнинг тебраниши ва кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини баҳолаш бўйича тадқиқотлар олиб борилган, жумладан, М.Р. Païdoussis, R.A. Ibrahim, Jan Łuczko, Andrzej Czerwiński, Amir Mehdi Dehrouyeh-Semnani, Esmaeil Dehdashti, Marco Amabili, Francesco Pellicano, Ye Tang, M.G. Kang, Liu Long, Xuan Fuzhen, Kuiper GL, Metrikine AV, Daniel G Gorman, Jason M Reese, Li Yun-dong, E.M. Attia, L.N. Panda, R.C. Kar, Jialin Tian, Changfu Yuan, Lin Yang ишларида. Эйлер-Бернулли тенгламалари билан ифодаланган балка типидagi эластик асосга эга қувурларнинг чизиксиз тебраниши ҳолати Xi Song, Shi-Rong Li, Silvia Petkova, Dimitar Kisliakov, Yordan Yordanov, Jiantao Li, Hua Deng, Wenjun Jiang илмий ишларида тадқиқ қилинган. Маҳаллий олимлардан Т.Рашидов, Т.Ш. Ширинқулов, И.С. Сафаров, Х. Худайназаров, Т. Мавлянов, Б.А. Худаяров, Р.А. Абдиқаримов, Ш.Бобоназаровлар стержен ҳамда цилиндрик типдаги эластик, ёпишқоқ-эластик қувурларнинг тебраниши, мустаҳкамлиги билан боғлиқ бўлган масалалар ва уларнинг ечимлари устида изланишлар олиб борганлар.

Шу билан бирга ёпишқоқ-эластиклик хусусиятга эга бўлган материаллардан тайёрланган қувурлар тебраниш жараёнлари етарли таҳлил қилинмаган, икки фазали суюқлик транспортировка қилувчи ёпишқоқ-эластик қувур тебраниш жараёнининг математик модели ишлаб чиқилмаган. Қувурларга таъсир қилувчи ташқи кучлар, пульсацияли оқим, бир ва икки

параметрли асосга бўлган ҳамда осма қувурларнинг тебраниш жараёнлари, суюқлик оқими критик тезлигини аниқлаш методикаси, моделлаштириш масалаларининг ҳисоблаш усуллари етарли даражада ишлаб чиқилмаган ва ривожлантирилмаган. Шу сабабли, предмет соҳалардаги жараёнлар ва ҳодисаларни адекват равишда тавсифловчи математик моделларни ҳамда ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш талаб қилинади.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқотлари Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институтининг ҚХА-13-001 «Ичидан суюқлик оқиб ўтувчи ёпишқоқ-эластик қувурлар тебраниш жараёнини математик моделлаштириш» (2015-2017) мавзусидаги лойиҳа ва №-2018-224 «Дифференциал тенгламалар ечимлари ва уларнинг инженерлик масалаларига тадбиқи» (2017-2020) институт илмий-тадқиқот ишлари мавзуси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади суюқлик транспортировка қилувчи ёпишқоқ-эластик қувурлар динамик жараёнларини баҳолаш учун математик моделлар, методлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва компьютер дастурларини яратишдан иборатдир.

Тадқиқотнинг вазифалари:

ўзгармас ва пульсацияли суюқлик транспортировка қилувчи Винклер, Пастернак ва Hetenyi' моделлари бўйича қувур асоси ҳисобга олинган ёпишқоқ-эластик қувурларнинг чизиқли ва чизиқсиз тебранишлари жараёнининг математик моделларини ишлаб чиқиш;

икки фазали суюқлик оқаётган ёпишқоқ-эластик қувур тебраниши жараёнининг математик моделларини ишлаб чиқиш;

ташқи таъсир кучлари ҳисобга олинган ёпишқоқ-эластик қувур тебраниши жараёнларининг математик моделларини ишлаб чиқиш;

суюқлик транспортировка қилувчи ёпишқоқ-эластик қувурлар тебраниши масалаларининг дискрет моделларини ишлаб чиқиш;

моделлаштириш масалалари ечимларининг зарурий аниқлиги ва наслий ёпишқоқ-эластик назарияси бўйича махсуслик ҳисобга олинган моделларда ҳисоблаш жараёнининг турғунлигини таъминлайдиган ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

қувур тебраниши жараёнларини моделлаштириш масалалари синфининг алгоритмлари асосида комплекс компьютер дастурларини яратиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида суюқлик транспортировка қилувчи ёпишқоқ-эластик қувурларнинг тебраниш жараёнлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети суюқлик транспортика қилувчи ёпишқоқ-эластик қувурлар тебраниш жараёнларининг математик модели, шунингдек, ҳисоблаш методлари, алгоритмлари ва компьютер дастурлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Наслий ёпишқоқ-эластиклик назарияси методлари; балка назариясининг математик методлари; интеграл ва интегро-дифференциал тенгламаларни сонли усулда ечиш методлари; амалий

комплекс компьютер дастурлари яратиш ва ҳисоблаш экспериментлари ўтказиш методларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

ўзгармас ва пульсацияли тезликка эга суюқлик оқиб ўтаётган ҳамда мужассамланган массалар, ички ва ташқи кучлар ҳисобга олинган ҳолда ёпишқоқ-эластик қувур тебраниш жараёнларининг математик моделлари ишлаб чиқилган;

икки фазали суюқлик оқаётган ёпишқоқ-эластик қувур асоси ва геометрик чизиксизликни ҳисобга олинган ҳолда қувур тебраниши жараёнининг математик модели ишлаб чиқилган;

қувурлардаги суюқлик оқими критик тезлигини аниқлаш методикаси ва ёпишқоқ-эластик қувурлар тебраниш жараёнлари сингуляр ядроли интегро-дифференциал тенгламаларини ечишнинг квадратур формулаларга асосланган ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

суюқлик транспортирка қилувчи ёпишқоқ-эластик қувурлардаги оқим критик тезликларини аниқлаш, мужассамланган массалар, қувурга таъсир этувчи кучлар, қувур материали ёпишқоқлик хусусиятлари ҳамда Винклер, Пастернак ва Hetenyi' моделлари асосида қувур асосларининг тебраниш жараёнига таъсирини тадқиқ қилиш учун комплекс компьютер дастурларининг тузилмаси яратилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

Винклер модели асосида ёпишқоқ-эластик асос хусусияти ҳисобга олинган қувур тебраниш жараёнининг математик модели, ҳисоблаш алгоритми ва компьютер дастури ишлаб чиқилган;

икки параметрли Пастернак модели бўйича қувур асоси ҳисобга олинган ҳолда ичидан икки фазали суюқли оқим ўтаётган ёпишқоқ-эластик қувурнинг чизикли ва чизиксиз тебранишларини таҳлил қилиш, оқим критик тезлиги аниқлаш усуллари, алгоритмлари ва дастурлари ишлаб чиқилган;

пульсацияли оқимнинг қувурнинг чизикли ва чизиксиз тебранишига, Hetenyi' модели бўйича қувур ёпишқоқ-эластик асоси ҳисобга олинган осма қувурларнинг тебраниши жараёнини тадқиқ қилиш ва оқим критик тезликларини аниқлашнинг усуллари ишлаб чиқилган;

ёпишқоқ-эластик қувурларга стационар ташқи кучлар ва мужассамлашган массаларнинг қувур тебранишини сонли усул асосида ҳисоблаш имконини берувчи алгоритмлар ва дастурлар ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончилиги ёпишқоқ-эластиклик назарияси, балкалар назарияси, интегро-дифференциал тенгламаларни сонли ечиш усуллари кўллаш ҳамда қувурларнинг тебраниши жараёнлари натижалари хорижий илмий журналлардаги муаллифларнинг натижалари билан таққосланганлиги, сонли ечимларнинг хусусий ҳолда аналитик ечимлар билан ўзаро солиштирилганлиги билан асосланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти наслий деформацияланувчан ёпишқоқ-

эластик назариясининг интеграл моделлари асосида бир ва икки фазали қувурларнинг тебранишларининг ҳаракат тенгламалари ва ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқишдан иборат. Ишлаб чиқилган математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва компьютер дастурлари нефть-газ қувурлари ва гидротехник иншоотларида сув чиқариш қувурларини лойиҳалаштириш ҳамда математик моделлаштириш назариясига муҳим ҳисса қўшиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти қувур материали ва қувур асосининг ёпишқоқ-эластиклик хусусиятлари, суюқлик оқимининг ўзгармас ва пульсацияли ҳаракати ҳамда қувурларга таъсир этувчи турли ташқи факторларни ҳисобга олган ҳолда ишлаб чиқилган математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва компьютер дастурлари сув хўжалиги, химия ва нефть-газ саноати масалаларини ечишда ҳамда таълим жараёнига қўлланиши билан изоҳланади

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Суюқлик транспортировка қилувчи қувурларнинг динамик ҳолатини баҳолаш учун математик моделлар, методлар ва алгоритмлар ишлаб чиқиш асосида:

турли аралашмали суюқликнинг сув чиқариш қувури тебраниш жараёнига таъсири, сув омборлари сув чиқариш қувурларига ташқи кучларнинг таъсири ва грунтли асоснинг икки фазали суюқлик оқиб ўтаётган сув чиқариш қувури тебраниши жараёнига таъсирини баҳолаш учун «Чимқўрғон» сув омборида жорий қилинган (Сув хўжалиги вазирлигининг 2020 йил 13 февралдаги №02/25-543-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижалари қувурларнинг мустақамлигини ва уларнинг турли ташқи кучларга чидамлигини аниқлаш мақсадида муҳандислик ҳисобларини ўтказишга кетадиган вақтни 1,4 марта камайтириш имконини берган;

икки фазали суюқликлар ва қувур грунтли асосининг ҳамда қувур материали реологик параметрларнинг таъсирини баҳолаш учун Андижон сув омборидаги сув чиқариш қувурларига жорий қилинган (Сув хўжалиги вазирлигининг 2020 йил 13 февралдаги №02/25-543-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижаларининг қўлланиши сув омбори сув чиқариш қувурларида юзага келадиган ўзгарувчан оқим тезлиги, қувурда босим ўзгариши ва қувурларнинг яроқлилигини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари, жумладан 2 та халқаро ва 4 та республика миқёсидаги илмий техникавий ва илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот иши бўйича жами 19 та илмий иш эълон қилинган бўлиб, жумладан, Scopus рефератив базага кирувчи юқори импакт факторли халқаро журналларда 8 та, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижалари чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 2 та мақола журналларда нашр этилган ҳамда Ўзбекистон

Республикаси интеллектуал мулк агентлигидан 2 та ЭХМ учун яратилган дастурий воситаларни қайд қилиш гувоҳномалари олинган.

ТАҚДИМОТНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

1. Численное моделирование колебаний вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих двухфазное пробковое течение. Вестник Томского Государственного Университета Математика и механика. 2019, №61 Стр.95-110. DOI 10.17223/19988621/61/9

Мақолада икки фазали суюқлик транспортировка қилувчи ва ички босим ҳисобга олинган ҳолда ёпишқоқ-эластик горизонтал қувур тебранишининг математик модели яратилган. Ичидан газ аралашмали суюқлик ўтувчи қувур тебранишини тадқиқ қилишда балка назариясининг ёпишқоқ-эластик моделидан фойдаланилган. Қувур материали ёпишқоқ-эластиклик хоссасини ифодалаш учун Больцман-Вольтерр наслий ёпишқоқ-эластиклик назариясининг кучсиз сингуляр ядроси қўлланилган. Релаксация ядроси сифатида Колтунов-Ржаницын ядроси танланган.

Икки фазали суюқлик транспортировка қилувчи ва ички босим ҳисобга олинган ҳолда ёпишқоқ-эластик горизонтал қувур тебранишининг ҳаракат тенгламаси қуйидаги кўринишда бўлади:

$$EI(1 - R^*) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(m_L U_L + m_g U_g) \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + (m_L U_L^2 + m_g U_g^2 - N_0 + A_{Lp} P_i) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (m_L + m_g + m_p) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \quad (1)$$

Бу ерда E -эластиклик модули; EI –эгилиш бикрлиги; L – қувур узунлиги (расм.1); x – қувур бўйлама ўқининг координатаси; $w(x, t)$ – t вақт моментдаги x кесимдаги эгилиш; m_L , m_g ва m_p – қувур бирлик узунлигидаги мос равишда, суюқлик, газ ва қувур массаси; A_p – қувур кўндаланг кесим юзаси; U_L , U_g – суюқлик ва газ оқими тезлиги; P_i – ички босим; $A_{Lp} = \pi r_1^2$; r_1 , A_{Lp} – мос равишда қувурнинг ички радиуси ва кўндаланг кесими юзаси; N_0 – тортувчи (сиқувчи) куч; R^* -интеграл оператор: $R^* \varphi(t) = \int_0^t R(t - \tau) \varphi(\tau) d\tau$;

$R(t - \tau)$ – Колтунов-Ржаницыннинг релаксация ядроси.

(1) тенгламанинг тақрибий ечимини қуйидаги кўринишда излаймиз:

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^N w_n(t) \varphi_n(x) \quad (2)$$

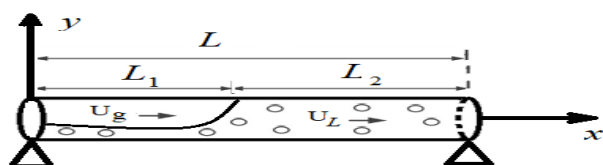
бунда $w_n(t)$ - аниқланадиган номаълум функция, $\varphi_n(x)$ функция шундай танланганки, (2) йиғиндининг ҳар бир ҳади чегаравий шартларни

каноатлантиради. (2) функцияни (1) тенгламага қўямиз ва Бубнов-Галеркин процедурасини қўллаймиз. Ўлчовсиз миқдорлар киритамиз ва аввалги белгилашларни сақлаган ҳолда w_n нисбатан интегро-дифференциал тенгламалар системасини ҳосил қиламиз:

$$\sum_{n=1}^N \Delta_{kn} \ddot{w}_n + 2 \sum_{n=1}^N G_{Lg, kn} \dot{w}_n - \sum_{n=1}^N P_{Lg, kn} w_n + \alpha_{0k} (\bar{N}_0 - \pi P_0) w_k + \alpha_{0k}^2 (1 - R^*) w_k = 0, \quad (3)$$

$$w_n(0) = w_{0nm}; \quad \dot{w}_n(0) = \dot{w}_{0nm}; \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Бу ерда $\Delta_{kn} = \theta_{Lkn} + \theta_{gkn}$; $G_{Lg, kn} = \beta_L u_L \gamma_{Lkn} + \beta_g u_g \gamma_{gkn}$; $P_{Lg, kn} = \alpha_{0n} (\theta_{Lkn} u_L^2 + \theta_{gkn} u_g^2)$;
 $\theta_{gkn} = \int_0^{\bar{L}_1} \varphi_n(x) \varphi_k(x) dx$; $\theta_{Lkn} = \int_{L_1}^1 \varphi_n(x) \varphi_k(x) dx$; $\gamma_{gkn} = \frac{1}{n\pi} \int_0^{\bar{L}_1} \varphi'_n(x) \varphi_k(x) dx$; γ_{Lkn} ,
 β_g , \bar{P}_i , u_L , u_g , β_L , α_{0k} , \bar{N}_0 , \bar{L}_1 -ўлчовсиз параметрлар.



Расм.1. Қувур қисмининг геометрияси

Интегро-дифференциал тенгламанинг ечими квадратур формулаларга асосланган сонли ўсул ёрдамида аниқланади. (3) тенгламани t бўйича икки марта интеграллаймиз ва R^* интеграл операторда сингуляр махсусликни рационал алмаштириш ёрдамида йўқотамиз. Натижада, $t=t_i$, $t_i=i\Delta t$, $i=1, 2, \dots (\Delta t=const)$ ўрнига қўйиш ва $w_{ikl}=w_{kl}(t_i)$ миқдорни ҳисоблаш учун интегралларни трапеция квадратур формуласи билан алмаштириш ёрдамида, Колтунов – Ржаницын $\left(R(t) = A \cdot \exp(-\beta t) \cdot t^{\alpha-1}, 0 < \alpha < 1 \right)$ ядроси учун қуйидаги формулани ҳосил қиламиз:

$$\sum_{n=1}^N (\Delta_{kn} + C_i G_{Lg, kn}) w_{in} = \sum_{n=1}^N \Delta_{kn} (w_{0n} + \dot{w}_{0n} t_i) + \sum_{n=1}^N G_{Lg, kn} w_{0n} t_i - \sum_{j=0}^{i-1} C_j \left\{ \sum_{n=1}^N G_{Lg, kn} w_{jn} - (t_i - t_j) \left(\sum_{n=1}^N P_{Lg, kn} w_{jn} + \alpha_{0k} (\bar{N}_0 - \pi \bar{P}_0) w_{jk} + \alpha_{0k}^2 \left(w_{jk} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) w_{j-s, k} \right) \right) \right\}, \quad (4)$$

$i=1, 2, 3, \dots$; бу ерда C_j , B_s - трапеция квадратур формулаларининг сонли коэффициентлари.

1-жадвалда оқим критик тезликларининг қувур физик-механик ва геометрик параметрларига боғлиқлиги кўрсатилаган. Жадвалдан кўринадики,

$A = 0$ эластик ҳолда u_{gcr} критик тезлик қиймати 3.133, $A = 0.1$ ёпишқоқ-эластик қувур учун 1.911 қийматга тенг бўлади. Ёпишқоқ-эластик қувур учун газ оқими критик тезлиги қиймати эластик қувур критик тезлигига нисбатан 39% фоизга камаяди.

1- Жадвал

Икки фазаги оқим критик тезлигининг қувур физик-механик ва геометрик параметрларига боғлиқлиги

| A | α | β | β_L | β_g | \bar{L}_1 | \bar{N}_0 | \bar{P}_i | u_L | $u_{g,cr}$ |
|-------|----------|---------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------|------------|
| 0 | | | | | | | | | 3.133 |
| 0.005 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 3.086 |
| 0.05 | | | | | | | | | 2.610 |
| 0.1 | | | | | | | | | 1.911 |
| | | | | | | | | | |
| 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 2.159 |
| | 0.05 | | | | | | | | 2.760 |
| | 0.1 | | | | | | | | 2.942 |
| | 0.75 | | | | | | | | 3.062 |
| 0.01 | 0.25 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 3.031 |
| | | 0.08 | | | | | | | 3.037 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.001 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 3.044 |
| | | | 0.1 | | | | | | 3.051 |
| | | | 0.7 | | | | | | 3.034 |
| | | | | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.007 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 3.038 |
| | | | | 0.1 | | | | | 3.041 |
| | | | | 0.5 | | | | | 3.055 |
| | | | | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.2 | 0.025 | - | 0.3 | 3.042 |
| | | | | | 0.3 | | | | 3.033 |
| | | | | | 0.32 | | | | 3.027 |
| | | | | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0 | - | 0.3 | 3.027 |
| | | | | | | 0.1 | | | 3.051 |
| | | | | | | 3 | | | 3.489 |
| | | | | | | 6 | | | 3.894 |
| | | | | | | 15 | 4.918 | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | 0.5 | 0.3 | 2.771 |
| | | | | | | | 1 | | 2.472 |
| | | | | | | | 2 | | 1.717 |
| | | | | | | | 2.5 | | 1.189 |

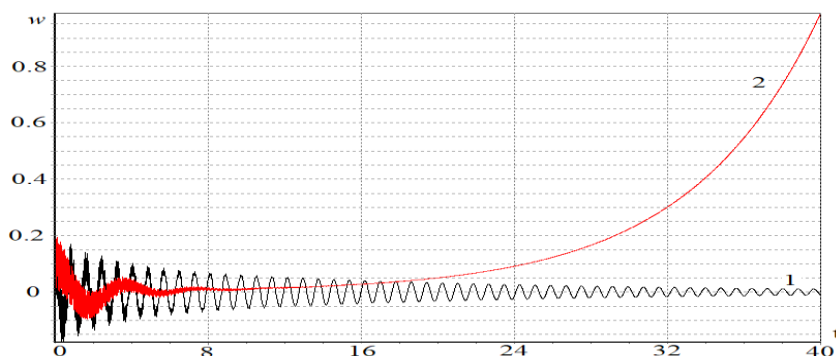
2. Vibration and dynamic stability of composite pipelines conveying a two-phase fluid flows. Engineering Failure Analysis. 2019, Vol.104, Pp. 500-512. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.025>

Мақолада икки фазаги оқимни транспортировка қилувчи қувур тебраниш жараёнини тадқиқ қилиш натижалари берилган. Ичидан газ-суюқлик оқаётган қувур тебранишини тадқиқ қилишда ёпишқоқ эластик балка назарияси модели ва Винклер модели бўйича қувур асоси ҳисобга олинган.

Икки фазаги пробкали оқим транспортировка қилувчи ва конструкция материали ёпишқоқлик хусусияти ва грунтли асос ҳисобга олинган ҳолда қувур тебранишининг ҳаракат тенгламаси куйидаги кўринишда бўлади:

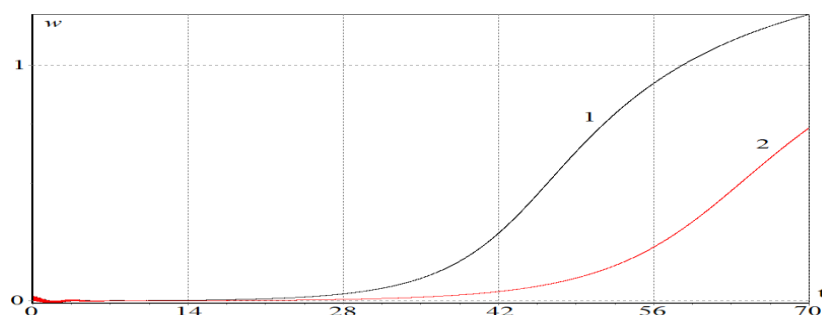
$$\begin{aligned}
& EI(1-R^*)\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(m_L U_L + m_g U_g)\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + \\
& (m_L U_L^2 + m_g U_g^2)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (m_L + m_g + m_p)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \\
& k_1(1-R_1^*)w - \left[N_0 + \frac{E(1-R^*)A_0}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0.
\end{aligned} \tag{5}$$

Кувур тебранишига оқим суюқлик фазаси u_L тезлигининг таъсири ўрганилди. Ёпишқоқ-эластик ($A=0.01$) кувур ва грунт асоси ($A_1 = 0.01$) ҳисобга олинган ҳолда суюқлик фазаси тезлигининг $u_L=1.4$ (1-эгри чизик); $u_L=2.92$ (2-эгри чизик) ҳар хил қийматларида кувур эгилиш функциясининг графиклари 2-расмда келтирилган. Суюқлик фазаси тезлигининг $u_L=1.4$ қийматида кувур тебраниш амплитудаси сўнади. Суюқлик фазаси тезлиги $u_L=2.92$ гача оширилганда кувур тебраниш амплитудаси вақт ўтиши билан тезда ўсади. Бунинг сабаби, суюқлик фазаси тезлиги оқим критик тезлигидан каттадир. Натижада, амплитудаси вақт ўтиши билан ўсиб борадиган тебранма ҳаракат конструкциянинг турғунлигини йўқотишга олиб келади.



2-расм. Оқим суюқлик фазасининг $u_L=1.4$ (1-эгри чизик); $u_L=2.92$ (2-эгри чизик) тезликларига $w(t)$ эгилишнинг боғлиқлиги.

k_w Винклер асос параметрининг тебраниш жараёнига таъсири тадқиқ қилинди (3-расм). Графикдан кўринадики, грунтли асоснинг $k_w=4.8$ (1-эгри чизик) ва $k_w=5.1$ (2-эри чизик) иккита қийматлари учун $u_L=1.5$ ва $u_g=2.81$ тезликда кувурда динамик нотурғунлик ҳосил бўлади, кувур тебраниши амплитудаси вақт ўтиши билан тезда ўсишга олиб келади.



3-расм. $k_w=4.8$ (1-эгри чизик); $k_w=5.1$ (2-эгри чизик) қийматларда қувор w эгилишининг t вақтга боғлиқлиги.

3.The effect of two-parameter of Pasternak foundations on the oscillations of composite pipelines conveying gas-containing fluids. International Journal of Pressure Vessels and Piping №176 (2019) 103946. DOI: [10.1016/j.ijpvp.2019.103946](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.103946)

Мақолада ёпишқоқ-эластик икки параметрли Пастернак асоснинг икки фазали оқимни транспортировка қилувчи композицион қувор тебранишига таъсири тадқиқ қилинган. Ичидан газ-суюқлик оқаётган қувор тебранишини тадқиқ қилишда ёпишқоқ эластик балка назарияси модели ва Пастернак модели бўйича қувор асоси ҳисобга олинган.

Газ-суюқлик оқаётган композицион қуворларнинг интегро-дифференциал ҳаракат тенгламаси қуйидагидан иборат

$$EI(1 - R^*) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(m_L U_L + m_g U_g) \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + (m_L U_L^2 + m_g U_g^2) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (m_L + m_g + m_p) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + (1 - R_1^*) \left[k_1 w - k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] - \left[N_0 + \frac{E(1 - R^*) A_0}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (6)$$

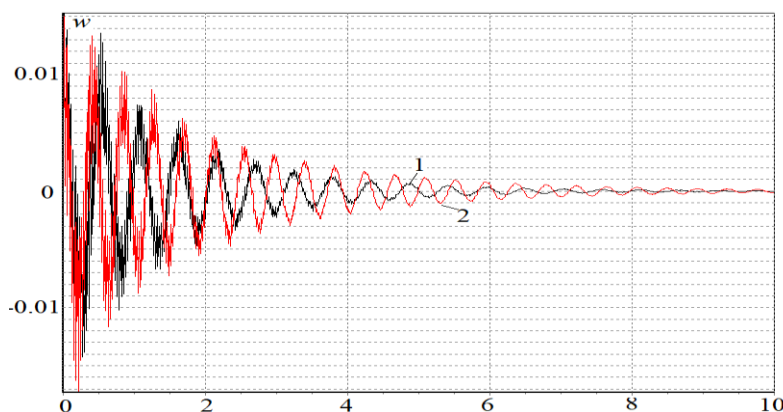
Бу ерда k_1 - грунтнинг вертикал қисилишида унинг қолдиқ қисми билан интенсивлигини боғловчи сиқувчи коэффициент; k_2 -қўзғалиш коэффициенти.

2-Жадвал

k_w параметрнинг ҳар хил қийматлари учун критик тезлик қийматлари

| k_w | Doare and de Langre | Chellapilla and Simha | Present work |
|----------|---------------------|-----------------------|--------------|
| 1.00E+00 | 3.1577 | 3.15768 | 3.1565 |
| 1.00E+01 | 3.2989 | 3.29891 | 3.2996 |
| 1.00E+02 | 4.4723 | 4.47233 | 4.4789 |
| 2.00E+02 | 5.4894 | 5.48943 | 4.9040 |

Сонли натижаларнинг ишончлиги тест масала мисолида исботланади. Тадқиқотлар натижаларидан кўринадики, хусусий ҳолда бир фазали суюқлик транспортировка қилувчи ($A = A_1 = 0$) эластик қувурни сонли моделлаштиришда олинган натижалар Chellapilla and Simha², Doare and de Langre³ (2-жадвал) натижалари билан устма уст тушади.



4-расм. $k_w = k_p = 2.4$ (1-эгри чизик) ва $k_w = k_p = 2.95$ (2-эгри чизик) қийматларда қувур w эгилишининг t вақтга боғлиқлиги.

Пастернак модели бўйича k_w ва k_p параметрларнинг қувур тебранишига таъсири тадқиқ қилинди (4-расм). Графикдан кўринадики, асоснинг бикрлиги ошиши тебраниш частотаси ошишига олиб келади.

4.Numerical Simulation of Vibration Composite Pipelines Conveying Pulsating Fluid. International Journal of Applied Mechanics. 2019, Vol.11, No.09. 1950090 <https://doi.org/10.1142/S175882511950090X>

Суюқлик транспортировка қилувчи композицион материалдан иборат стержен типдаги L узунликдаги қувурнинг тўғри чизиқли қисмини ўрганамиз. Тўғри бурчакли координаталар системасини шундай танлаймизки, x ўқи бўйлаб қувур кесими оғирлик маркази ўтсин ва координата боши қувурнинг чап учига бўлсин. Қувур ўқи нуқта координаталарининг ордината ўқи бўйлаб кўчишини номаълум $w(x, t)$ эгилиш функцияси ташкил қилсин. Қувур горизонтал ва ҳаракат текис деб фараз қиламиз. Ундан ташқари, қувурнинг кўндаланг вибрацияси Эйлер-Бернулли балкасини ифодалайди ва суюқлик пульсацияли оқимга эга. Пульсацияли $U_f(t)$ оқим тезлиги гармоник тебранишга эга деб фараз қилинади ва қуйидаги кўринишдаги формула билан ифодаланади:

² Kameswara Rao Chellapilla, H.S.Simha, Critical velocity of fluid-conveying pipes resting on two-parameter foundation. [Journal of Sound and Vibration](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.05.011). 302(1-2) (2007) 387-397.

³ O. Doarer , E. de Langre, Local and global instability of fluid conveying pipes on elastic foundation. *Journal of Fluids and Structures*. 16 (2002) 1–14.

$$U_f(t) = U_0(1 + \mu_1 \cos \omega t), \quad (7)$$

бу ерда U_0 - суюқликнинг ўзгармас тезлиги, μ_1 - кўзғатувчи коэффициент, ω - суюқлик пульсация частотаси. Оқимнинг пульсацияли тезлиги ҳаракат тенгламасида параметрик ҳад ичида бўлиб, амплитудаси чегараланмаган ҳолда ўсувчи параметрик тебранишга олиб келиши мумкин ва натижада параметрик резонанс ҳолати юз беради.

Суюқлик транспортировка қилувчи қувурнинг ҳаракат тенгламаси таянч Нетенуи' асос, конструкция материали ёпишқоқлик хусусияти, ўк бўйлаб йўналган куч, ички босим ва ёпишқоқ эластик Винклер асосни ҳисобга олган ҳолда қуйидаги кўринишда бўлади:

$$EI(1 - R^*) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2m_f U_f \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + m_f(L - x) \frac{\partial U_f}{\partial t} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (m_f + m_p) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \left[m_f U_f^2 - N_0 + A_p P_i(1 - 2\nu) \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (1 - R_1^*) \left[k_1 w + B \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right] = 0. \quad (8)$$

Бу ерда B – туташ қатлам эгилишидаги бикрлик.

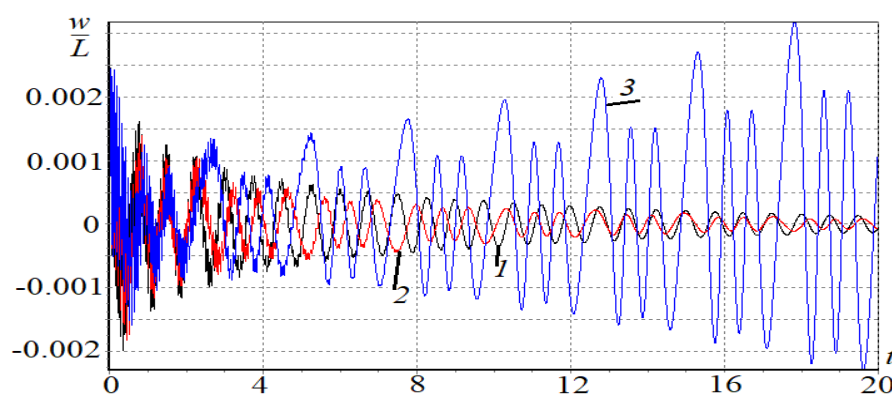
Кўзғатувчи коэффициентнинг оқим критик тезлигига таъсири ўрганилди. Кўзғатувчи μ_1 коэффициентнинг ўсиши $U_{f,cr}$ критик тезлик ўзгаришига сезиларли таъсир қилади. $\mu_1=0.1$; $\mu_1=0.3$; $\mu_1=0.5$ ва $\mu_1=0.75$ (3-жадвал) қийматлар учун тадқиқотлар ўтказилди. Жадвалдан кўринадики, кўзғатувчи μ_1 коэффициентнинг ўсиши суюқлик оқими критик тезлиги камайишига олиб келади.

Суюқлик пульсация частотасининг $U_{f,cr}$ критик тезликка таъсири ўрганилди. $\omega=5$, 7 ва 15 қийматлар учун ҳисоблаш ишлари бажарилди. 2-жадвалдан кўринадики, частотанинг $\omega=5$ қийматида $U_{f,cr}$ критик тезлик 2.363 қийматга, $\omega=15$ қийматда критик тезлик 1.669 қийматни ташкил қилади. Частотанинг $\omega=5$ ва $\omega=15$ қийматларида оқим критик тезликлари орасидаги фарқ 29.4% ташкил қилади.

5-расмда келтирилган ҳисоблаш натижалари муҳим қизиқиш ўйғотади. Натижалар кўзғатувчи коэффициентнинг $\mu_1=0.1$ (1-эгри чизик), $\mu_1=0.5$ (2-эгри чизик) қийматларига тегишлидир. Расмдан кўринадики, пульсацияли суюқлик оқаётган қувур тебраниш амплитудаси вақт ўтиши билан сўнади (1, 2 эгри чизиклар). Кўзғатувчи коэффициентнинг ўсиши тебраниш амплитудасининг ўзгаришига олиб келади. Агар кўзғатувчи коэффициент $\mu_1=0.7$ қийматгача ошса, тебраниш амплитудаси вақт ўтиши билан тезда ўсиб боради, бу эса конструкциянинг зарарланиши ва зарарланган жойларнинг ортишига олиб келиши мумкин.

Суюқлик оқими критик тезлигининг қувурнинг физик-механик ва геометрик параметрларига боғлиқлиги

| β_{fp} | μ_1 | ω | k_w | \bar{P} | \bar{N}_o | G | $U_{f,cr}$ |
|--------------|---------|----------|-------|-----------|-------------|---------------------|------------|
| 0.2 | | | | | | | 2.271 |
| 0.4 | 0.4 | 2.5 | 1 | - | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 2.265 |
| 0.7 | | | | | | | 2.251 |
| 0.1 | 0.1 | | | | | | 2.737 |
| | 0.3 | 5 | 1 | - | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 2.447 |
| | 0.5 | | | | | | 1.913 |
| | 0.75 | | | | | | 1.698 |
| 0.1 | 0.4 | 5 | | | | | 2.363 |
| | | 7 | 1 | - | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 2.018 |
| | | 15 | | | | | 1.669 |



5-расм. $\mu_1=0.1$ (1); $\mu_1=0.5$ (2); $\mu_1=0.7$ (3) қийматларда қувур w эгилишининг t вақтга боғлиқлиги.

5. Dynamic analysis of the suspended composite pipelines conveying pulsating fluid. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 75 (2020) 103148. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103148>

Суюқлик транспортировка қилувчи қувурнинг чизиксиз ҳаракат тенгламаси таянч Нетенуи' асос, конструкция материали ёпишқоқлик хусусияти, ўқ бўйлаб йўналган куч, ички босим ва ёпишқоқ эластик Винклер асосни ҳисобга олган ҳолда қуйидаги кўринишда бўлади:

$$\begin{aligned}
 & EI(1-R^*) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2m_f U_f \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + (m_f + m_p) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \\
 & \left[m_f U_f^2 \frac{\lambda L}{4d} + m_f (L-x) \frac{\partial U_f}{\partial t} - \frac{EA_0}{2L} (1-R^*) \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \\
 & + \left[m_f U_f^2 - N_0 + A_p P_i \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (1-R_1^*) \left[k_1 w + B \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right] = 0.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Қаршилик кучи γ_{Re} параметрнинг ламинар ва пульсацияли оқим критик тезликка таъсири тадқиқ қилинди. γ_{Re} параметрнинг ортиши (ёки Рейнольдс сони қиймати камайиши) билан оқим критик тезлиги камаяди. Рейнольдс сонининг катта (ёки қаршилик кучи қичик) қийматларида ламинар оқим режими нотурғун ҳолатга келади ва турбулент режим ўтади. Рейнольдс сонининг суяқлик оқими критик тезлиги аниқланган қиймати Рейнольдс сонининг критик қийматини ташкил қилади. Қаршилик кучининг 0.0234375; 0.046875; 0.375; 0.75; 1.5; 1.875 қийматларига 2.264; 2.237; 1.832; 1.624; 1.451; 1.353 оқим критик тезлик қийматлари мос келади. 4-жадвалда худди шундай натижалар ламинар оқим учун келтирилган. Ламинар оқимда ҳам γ_{Re} қаршилик кучининг ошиши оқим критик тезлиги камайишига олиб келади.

4-жадвал

Суяқлик оқими критик тезлигининг қувурнинг физик-механик ва геометрик параметрларига боғлиқлиги

| β_{fp} | k_w | \bar{p} | \bar{N}_o | G | γ_{Re} | μ_1 | $U_{f,cr}$ |
|--------------|-------|-----------|-------------|---------------------|---------------|---------|--------------|
| 0.32 | 1 | 1 | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 0.0234375 | 0.4 | 2.264 |
| | | | | | 0.046875 | | 2.237 |
| | | | | | 0.375 | | 1.832 |
| | | | | | 0.75 | | 1.624 |
| | | | | | 1.5 | | 1.451 |
| | | | | | 1.875 | | 1.353 |
| 0.32 | 1 | 1 | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 0.1875 | 0 | 2.795 |
| | | | | | | 0.1 | 2.566 |
| | | | | | | 0.2 | 2.315 |
| | | | | | | 0.3 | 2.201 |
| | | | | | | 0.4 | 1.969 |
| | | | | | | 0.45 | 1.920 |

6. Numerical simulation of vibration of composite pipelines conveying fluids with account for lumped masses. International Journal of Pressure Vessels and Piping 179 (2020) 104034

Мақолада мужассамлашган массани ҳисобга олган композицион қувур вибрацияси масаласи тадқиқ қилинади. Суяқлик оқимини транспортировка қилувчи, таянч Винклер асос ва мужассамлашган масса ҳисобга олинган ҳолда қувур ҳаракати математик модели яратилган. Бир жинсли стерженда умумий N та нукталарда x_r координатали M_r массалар жойлашган бўлиб, массалар тақсимоти куйидагича бўлсин

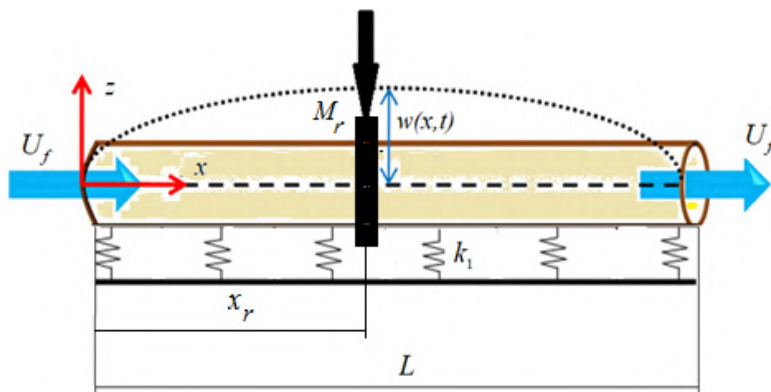
$$M(x) = m_f + m_p + \sum_{r=1}^N M_r \delta(x - x_r), \quad (11)$$

бу ерда δ - Дирак дельта-функцияси; m_p – бирлик узунликка мос қувур массаси.

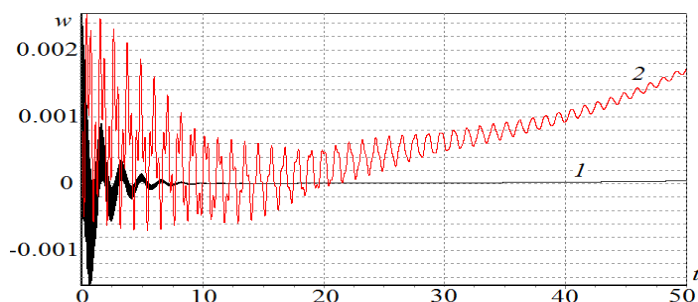
8-расмда келтирилган ҳисоблаш натижалари муҳим аҳамият касб этади. Натижалар қувур мужассамлашган массали ва массасиз ҳолатга тегишлидир.

8-расмда мужассамлашган масса ҳисобга олинган қувур марказий нуқтасининг ҳаракати келтирилган. Расмдан кўринадики, мужассамлашган масса $M_1=100$ (2-эгри чизик) бўлган ҳолда ҳаракат нотурғун бўлади, мужассамлашган масса $M_1=0$ бўлган ҳолда конструкция ҳаракати секин сўнувчи тебранишга келади.

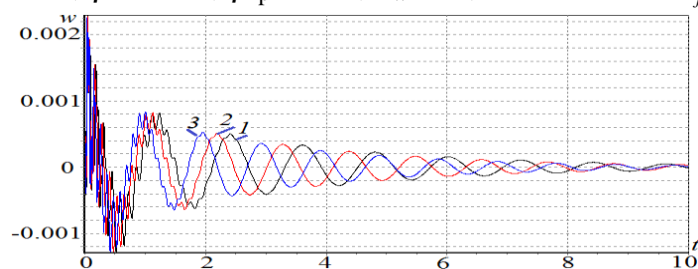
Мужассамлашган масса ўрнининг қувур тебранишига таъсири тадқиқ қилинди (9-расм). Мужасамлашган массалар қуйидаги нуқталарда жойлашган: $x_r=L/2$ (1-эгри чизик); $x_r=L/3$ (2-эгри чизик), $x_r=L/4$ (3-эгри чизик). Расмдан кўринадики, мужассамлашган массаларнинг қувур узунлиги бўйлаб марказдан узоқлашганда тебраниш частотаси ошиб боради.



7-расм. Мужассамлашган массали қувур



8-расм. $M_1=0$ (1); $M_1=100$ (2); $A=0.02$; $\alpha=0.25$; $\beta=0.05$; $A_1=0.15$; $\alpha_1=0.2$; $\beta_1=0.01$; $\beta_{fp}=0.32$; $k_w=10$; $\bar{N}_o = 2$; $\bar{P} = 5$; $U_f = 2.67$.



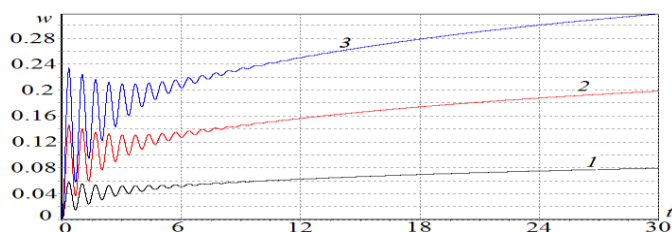
9-расм. $x_r=L/2$ (1); $x_r=L/3$ (2); $x_r=L/4$ (3); $A=0.02$; $\alpha=0.25$; $\beta=0.05$; $A_1=0.15$; $\alpha_1=0.2$; $\beta_1=0.01$; $\beta_{fp}=0.32$; $M_1=0.1$; $\gamma_{Re} = 0.1875$; $\bar{P} = 5$; $\bar{N}_o = 2$.

7. Numerical study of the effect of viscoelastic properties of the material and bases on vibration fatigue of pipelines conveying pulsating fluid flow. *Engineering Failure Analysis*. 2020, Vol.115.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104635>

Мақолада ёпишқоқ-эластик қувур тебраниш жараёнининг ташқи стационар кучни ҳисобга олган ҳолда математик моделлаштириш натижалари келтирилган.

10-расмда ёпишқоқ-эластик асос ҳисобга олинган композицион қувур эгилиш функцияси графиги келтирилган. Ҳисоб ишлари қуйидаги стационар кучлар учун бажарилган $q=2$ (1-эгри чизик), $q=5$ (2-эгри чизик) ва $q=8$ (3-эгри чизик). Ҳисоблашларда қуйидаги реологик параметрлардан фойдаланилди: $A=0.1$; $\beta=0.05$; $A_1=0.1$; $\alpha_1=0.25$; $\beta_1=0.05$. Расмдан кўринадики, ташқи куч қийматини оширилганда амплитудаси ўсувчи тебранма ҳаракат кузатилади, бундай вибрация конструкцияни ҳалакатга олиб келади.



10-расм. $q_1 = 2$ (1-эгри чизик); $q_1 = 5$ (2-эгри чизик); $q_1 = 8$ (3-эгри чизик) қийматларда қувур w эгилишининг t вақтга боғлиқлиги.

8. Numerical modeling of vibration fatigue of viscoelastic pipelines conveying pulsating fluid flow. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*. Volume 11, Issue 03 (June 2020) 2050024

Мақолада ёпишқоқ-эластик қувур тебраниш жараёнининг математик моделлаштириш натижалари келтирилган.

ХУЛОСА

Ишда наслий ёпишқоқ-эластик назарияси асосида ёпишқоқ-эластик қувурларнинг динамик ҳолатини баҳолаш учун математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва компьютер дастурлари яратилган. Қуйидаги илмий натижалар олинган:

1. Икки фазали суюқлик оқимини транспортировка қилувчи, Винклер ва икки параметрли Пастернак қувур асоси ҳисобга олинган ёпишқоқ-эластик қувур тебранишининг математик модели яратилди.

2. Суюқлик транспортировка қилувчи композицион қувур вибрациясининг математик модели конструкция материали ёпишқоқлик

хусусияти, қаршилиқ кучи ва мужассамлашган массани ҳисобга олган ишлаб чиқиди.

3. Hetenyi' ва Винклер моделлари бўйича қувур асоси, ўқ бўйлаб йўналган кучлар, ички босим ва ташқи кучларни ҳисобга олган ҳолда пульсацияли суюқлик оқимини транспортировка қилувчи қувур ҳаракатининг математик модели яратилди.

4. Икки фазали оқим ўтаётган қувур тебраниш жараёнининг чизиқли ва чизиқсиз масалаларининг ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди. Яратилган ҳисоблаш алгоритми асосида икки фазали газ-суюқлик оқиб ўтаётган ёпишқоқ-эластик қувур тебраниш жараёнини тадқиқ қилувчи амалий компьютер дастурлари мажмуаси ишлаб чиқилди.

5. Пульсацияли суюқлик оқиб ўтувчи композицион қувур тебраниши масаласи учун кучсиз сингуляр ядроли интегро-дифференциал тенгламаларида махсусликни йўқотишга асосланган ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди.

6. Пулсацияли суюқлик оқиб ўтувчи композицион қувур вибрацияси амплитуда-вақт бўйича тавсифлари ва турғунлиги деформацияланувчи тизим ва суюқлик оқимининг турли қийматларида тадқиқ қилинди.

7. Икки фазали оқим транспортировка қилувчи композицион қувур тебранишига икки параметрли Пастернак ёпишқоқ-эластик асосининг таъсири сонли таҳлил қилинди.

8. Чизиқли ва чизиқсиз масалаларни сонли моделлаштиришда бир қатор янги динамик самаралар олинди:

- конструкция материали ва қувур асосининг ёпишқоқ-эластик хусусиятлари оқим критик тезлигини 30-50 фоизгача камайтиришига олиб келди;

- қувур материали ёпишқоқ-эластиклик хусусиятини ҳисобга олиш тебраниш амплитудаси ва частотасини 20-40 фоизга камайишига олиб келди;

- газ пуфакчалари тўпланган қисм узунлиги ошиши қувур тебраниш амплитудаси ва частотасини камайишига олиб келди;

- Пастернак ва Винклер асос параметрлари, сингуляр параметр ҳамда Рейнольдс сони қиймати ошиши оқим критик тезлиги ошишига олиб келди;

- суюқлик пульсацияси частотаси, пульсацияли оқимнинг қўзғатувчи коэффициенти, мужассамлашган массалар параметри ва ички босимнинг ошиши оқим критик тезлигини 25-40% камайишга олиб келди;

- туташ қатлам эгилишидаги бикрликни тавсифловчи G асос коэффицент қийматининг ошиши тизимнинг нисбий бикрлиги ва оқим критик тезлиги ўсишига олиб келди;

- бўйлама йўналишда тортувчи куч параметри қийматининг ўсиши қувур мувозанатини сақлашга таъсир қилди;

- қувур узунлиги бўйлаб марказдан мужассамлашган массанинг узоқлашиши тебраниш частотаси ўсишига олиб келди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ИРРИГАЦИИ И
МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Комилова Холидахон Мухтаровна

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И
АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
ТРУБОПРОВОДОВ, ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ ЖИДКОСТЬ**

**05.01.07 - Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ**

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

**по присуждению ученой степени доктора философии (PhD) по техническим
наукам без защиты диссертации на основе статьи в научных журналах, входящих в
международную систему Scopus**

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2020.2.PhD/T1737

Представление выполнена в Ташкентском институте инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства

Презентация на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу (www.tuit.uz) и на информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу (www.ziyo.net)

Научный руководитель: Худаяров Бахтияр Алимович
доктор технических наук

Официальные оппоненты: Полатов Асхад Мухамеджонович
доктор физико-математических наук, профессор

Анарова Шахзода Аманбоевна
доктор технических наук, доцент

Ведущая организация: Ташкентский государственный технический университет

Обуждение представление состоится « 8 » апреля 2021 г. в 14⁰⁰ часов на заседании научного совета DSc.13/30.12.2019.T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий (Адрес: Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

С представлением можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер № ~~4/263~~ (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Представление разослано « 26 » марта 2021 года.
(протокол рассылки № 6 от « 26 » февраля 2021 года.)



Р.Х.Хамдамов
Председатель научного совета по
присуждению учёных степеней,
доктор технических наук, профессор

Ф. М.Нуралиев
Учёный секретарь научного совета по
присуждению учёных степеней,
доктор технических наук, доцент

Ш.А. Садуллаева
Председатель научного
семинара при научном совете
по присуждению учёных степеней,
доктор физико-математических наук

ВВЕДЕНИЕ (аннотация презентации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. Трубопроводная транспортировка нефти и газа в мире играет важную роль в экономическом развитии промышленности и производственных секторов многих стран, существует необходимость быстрого развития трубопроводного транспорта в этих странах. Трубопроводный транспорт отличается от других видов транспорта своей высокой экологической безопасностью и бесперебойной подачей продукции на определенные объекты хозяйства. Различные случайные аварии, возникающие во время эксплуатации трубопроводов, могут нанести большой вред окружающей среде и/или людям. Поэтому изучение вибрации композиционных трубопроводов, транспортирующих поток жидкости, которая широко используется в отраслях экономики, включая нефтегазовую отрасль, сельское и водное хозяйство, жилищно-коммунальное хозяйство и химическую промышленность, является одной из актуальных проблем. Исследователи из развитых стран, включая Соединенные Штаты, Канаду, Великобританию, Германию, Францию, Российскую Федерацию, Китай, Саудовскую Аравию и Турцию, приняли во внимание различные факторы, влияющие на гибкие горизонтальные и вертикальные композитные трубы для транспортировки жидкости, особое внимание уделяется снижению вибраций, возникающих в них, и обеспечению их надежной работы.

В мире проводятся обширные научные исследования по разработке математических моделей процессов устойчивости и вибрации композиционных трубопроводов, методов аналитического и численного решения, вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, позволяющие исследовать колебательные процессы вязкоупругих трубопроводов. В связи с этим анализ процесса вибрации трубопроводов под воздействием стационарных и нестационарных сил и сосредоточенных масс, а также определение критических скоростей жидкостей считаются важными темами исследований, включая однофазные и двухфазные потоки жидкости, жидкости с постоянными и переменными скоростями.

В нашей стране особое внимание уделяется проектированию и строительству сложных систем инженерных композиционных и полимерно-композиционных трубопроводов в нефтегазовой промышленности, сельском и водном хозяйстве, жилищно-коммунальном хозяйстве. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены такие задачи, как «...реализация целевых программ по развитию и модернизации инженерно-коммуникационной и социальной инфраструктур»¹. Реализация этой задачи, в том числе разработка

¹ Указ Президента Республики Узбекистан УП-4947 от 7 февраля 2017 года "О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан"

динамических методов, алгоритмов и вычислительных программ для решения задач вибрационного процесса в нефтегазовой отрасли, предприятиях водоснабжения и гидротехнических сооружений, имеет большое научное значение.

Данное диссертационное исследование направлено на реализацию целей, сформулированных в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему Развитию Республики Узбекистан», Постановлениях Президента № ПП-4708 от 7 мая 2020 года «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области математики», № ПП-4388 от 9 июля 2019 года «О мерах по стабильному обеспечения экономики и населения энергоресурсами, финансовому оздоровлению и совершенствованию системы управления нефтегазовой отраслью», № ПП-3286 от 25 сентября 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы охраны водных объектов» и других нормативных правовых актах, связанных с этой деятельностью.

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

Степень изученности проблемы. В последние годы проводились исследования для оценки вибрационного и напряженно-деформированного состояния трубопроводов в виде стержня и цилиндрических оболочек, результаты которых приводятся в научных работах *M.P. Paidoussis*, R.A. [Ibrahim](#), Jan Łuczko, Andrzej Czerwiński, Amir Mehdi Dehrouyeh-Semnani, Esmaeil Dehdashti, Marco Amabili, Francesco Pellicano, Ye Tang, M.G. Kang, Liu Long, Xuan Fuzhen, Kuiper GL, Metrikine AV, Daniel G Gorman, Jason M Reese, Li Yun-dong, E.M. Attia, L.N. Panda, R.C. Kar, Jialin Tian, Changfu Yuan, Lin Yang, в том числе состояние нелинейных колебаний упругих трубопроводов типа балки, представленных уравнениями Эйлера-Бернулли, изучалось в научных работах Xi Song, Shi-Rong Li, Silvia Petkova, Dimitar Kisliakov, Yordan Yordanov, [Jiantao Li](#), [Hua Deng](#), [Wenjun Jiang](#). Местные ученые Т.Рашидов, Т.Ш. Ширинкулов, И.С.Сафаров, Х.Худайназаров, Т.Мавлянов, Б.А.Худаяров, Р.А.Абдикаримов, Ш.Бобоназаров провели исследования по вопросам, связанным с вибрацией и прочностью упругих и вязкоупругих трубопроводов стержневых и цилиндрических типов и их решениями.

Однако процессы вибрации трубопроводов, изготовленных из материалов с вязкоупругими свойствами, недостаточно проанализированы, и математическая модель процесса вибрации вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих двухфазные жидкости, не была разработана. Внешние силы, действующие на трубы, пульсирующий поток, процессы вибрации подвесных трубопроводов с учетом одно- и двухпараметрических оснований,

методы определения критической скорости потока жидкости, методы расчета для задач моделирования недостаточно разработаны и не совершенствованы. Следовательно, необходимо разработать математические модели и вычислительные алгоритмы, которые адекватно описывают процессы и события в предметных областях.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.

Диссертационное исследование выполнено в соответствии с научно-исследовательскими планами Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства по проектам QXA-13-001 «Математическое моделирование колебательных процессов вязкоупругих трубопроводов с протекающей жидкостью» (2015-2017) и №-2018-224 «Решения дифференциальных уравнений и их реализация в инженерных задачах» (2017–2020).

Целью исследования является создание математических моделей, методов, вычислительных алгоритмов и компьютерных программ для оценки динамических процессов вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих жидкость.

Задачи исследования:

разработка математических моделей процесса линейных и нелинейных колебаний вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих жидкости с постоянными и пульсирующими скоростями, с учетом оснований на моделях Винклера, Пастернака и Хетеньи;

разработка математических моделей процесса вибрации вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих двухфазную жидкость;

разработка математических моделей вибрационных процессов вязкоупругих трубопроводов с учетом внешних сил;

разработка дискретных моделей задач вибрации вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих жидкость;

разработка вычислительных алгоритмов, обеспечивающих необходимую точность и устойчивость вычислительного процесса с учетом особенностей моделей, присущих наследственной теории вязкоупругости;

разработка комплекса программ, реализующих алгоритмы рассматриваемого класса задач моделирования колебания трубопроводов.

Объектом исследования являются колебательные процессы вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих жидкость.

Предметом исследования является математическая модель колебательных процессов вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих жидкость, а также вычислительные методы, алгоритмы и компьютерные программы.

Методы исследования. Методы наследственной теории вязкоупругости; математические методы теории балок; методы численного решения интегральных и интегро-дифференциальных уравнений;

использовались методы создания практических комплексных компьютерных программ и проведения вычислительных экспериментов.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

разработка математической модели движения трубопроводов, транспортирующих постоянный и пульсирующий поток жидкости, с учетом сосредоточенных масс, внутренних и внешних сил;

разработка математической модели процесса вибрации вязкоупругих трубопроводов с учетом геометрических нелинейностей и оснований, транспортирующих двухфазные жидкости;

разработаны вычислительные алгоритмы, основанных на исключении особенностей интегрально-дифференциальных уравнений с сингулярными ядрами, с последующим использованием квадратурных формул, для решения нелинейных задач колебательных процессов вязкоупругих трубопроводов и методика определения критических скоростей потоков жидкости в трубопроводах;

разработан комплекс прикладных программ для изучения влияния вязкоупругих свойств материала трубопровода и оснований моделей Винклера, Пастернака и Хетеньи, а также для определения критической скорости потока в вязкоупругих трубопроводах.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

на основе модели Винклера были разработаны математическая модель процесса вибрации трубопроводов, вычислительный алгоритм и компьютерная программа, учитывающая свойство вязкоупругости оснований;

разработаны методы, алгоритмы и программы для анализа линейных и нелинейных колебаний вязкоупругих трубопроводов, через которых проходит двухфазный поток жидкости, с учетом основы трубопровода на двухпараметрической модели Пастернака;

разработаны методы изучения процесса вибрации подвесных трубопроводов и определения критических скоростей пульсирующего потока с учетом линейных и нелинейных колебаний трубопроводов с учетом вязкоупругих оснований по модели Хетеньи;

на основе численного метода разработаны алгоритмы и программы, позволяющие исследовать колебания вязкоупругих трубопроводов с учетом стационарных внешних сил, и сосредоточенных масс.

Достоверность результатов исследования.

Достоверность результатов исследования подтверждается при проведении вычислительных экспериментов на основе теории вязкоупругости, теории балок, использовании численных решений интегро-дифференциальных уравнений и результатов вибрационных процессов трубопроводов по сравнению с результатами авторов в зарубежных научных журналах, в частном случае, численные решения сопоставлены с аналитическими решениями.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в разработке уравнений движения и вычислительных алгоритмов колебаний одно- и двухфазных трубопроводов на основе интегральных моделей наследственной теории вязкоупругости. Разработанные математические модели, вычислительные алгоритмы и компьютерные программы являются важным вкладом в проектирование нефтегазовых трубопроводов и водоотводных труб гидротехнических сооружений, а также в теорию математического моделирования.

Практическая значимость результатов исследования определяется тем, что математические модели, вычислительные алгоритмы и компьютерные программы, разработанные с учетом вязкоупругих свойств материала и основания трубы, постоянного и пульсирующего движения потока жидкости и различных внешних факторов, влияющих на трубопроводы могут быть использованы в водном хозяйстве, химической и нефтегазовой промышленности, а также в образовательном процессе.

Внедрение результатов исследования. На основе разработки математических моделей, методов и алгоритмов для оценки динамического поведения трубопроводов, транспортирующих жидкость:

использованы в Чимкурганском водохранилище для оценки влияния различных смешанных жидкостей на вибрационный процесс водоотводящей трубы, влияние внешних сил на водоотводящую трубу водохранилища и вибрации двухфазного потока жидкости грунтового основания трубопровода (Справка Министерства Водного хозяйства Республики Узбекистан №02/25-543 от 13 февраля 2020 г.). Результаты научных исследований позволили сократить время, необходимое для проведения инженерных расчетов, определить прочность труб и их устойчивость к различным внешним воздействиям в 1,4 раза;

внедрены в водоотводящих трубах Андижанского водохранилища для оценки влияния двухфазных жидкостей и реологических параметров грунтового основания и материала трубопроводов (Справка Министерства Водного хозяйства Республики Узбекистан №02/25-543 от 13 февраля 2020 г.). Применение результатов научных исследований позволило определить переменную скорость потока, возникающую в отводящих трубопроводах водохранилища, изменение давления в трубе и пригодность труб.

Апробация результатов исследования. Теоретические и прикладные проблемы по теме диссертации обсуждались на 2 международных и 4 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 19 научная работа, из них 8 в международных журналах с высоким импакт-фактором, включенным в реферативную базу данных Scopus, 2 научных статей в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных результатов докторской диссертации. Получены 2 свидетельства на

программные продукты Агентства по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПРЕЗЕНТАЦИИ

1. Численное моделирование колебаний вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих двухфазное пробковое течение. Вестник Томского Государственного Университета Математика и механика. 2019, №61 Стр.95-110. DOI 10.17223/19988621/61/9

В настоящей работе предложена математическая модель колебаний горизонтальных вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих двухфазное течение, учитывающая внутреннее давление. При исследовании колебаний трубопроводов с протекающей внутри газосодержащей жидкостью используется вязкоупругая модель теории балок. Для описания вязкоупругих свойств материала трубопровода использована наследственная теория вязкоупругости Больцмана-Вольтерра со слабо-сингулярными ядрами наследственности. В качестве ядра релаксации использовано ядро Колтунова-Ржаницына.

Уравнение движения трубопроводов, транспортирующих двухфазный поток, с учетом свойств вязкости материала конструкций и внутреннее давление имеет вид:

$$EI(1 - R^*) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(m_L U_L + m_g U_g) \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + (m_L U_L^2 + m_g U_g^2 - N_0 + A_{Lp} P_i) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (m_L + m_g + m_p) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \quad (1)$$

Здесь E -модуль упругости материала; EI – жесткость изгиба; L – длина трубы (рис.1); x – независимая переменная, продольная осевая координата трубы; $w(x, t)$ – прогиб в сечении x в момент времени t ; m_L , m_g и m_p – масса жидкости, газа и трубы соответственно, отнесенная к единице длины трубопровода; A_p – площадь поперечного сечения трубы; U_L , U_g – скорости потока жидкости и газа соответственно; P_i – внутреннее давление; $A_{Lp} = \pi r_1^2$; r_1 , A_{Lp} – внутренний радиус и площадь проходного сечения трубопровода соответственно; N_0 – растягивающее (сжимающее) усилие; R^* -интегральный оператор вида: $R^* \varphi(t) = \int_0^t R(t - \tau) \varphi(\tau) d\tau$; $R(t - \tau)$ – ядро релаксации Колтунова-Ржаницына.

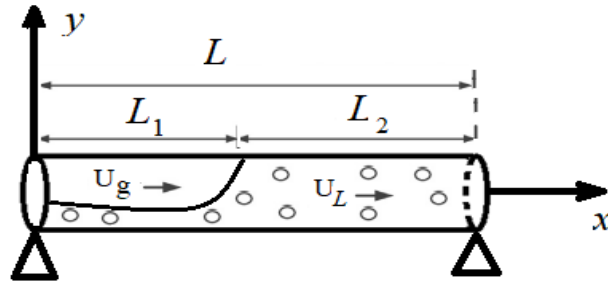


Рис.1. Геометрии проточной части трубопровода

Приближенное решение уравнения (1) будем искать в виде:

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^N w_n(t) \varphi_n(x) \quad (2)$$

где $w_n(t)$ - некоторые функции, подлежащие к определению, при этом функции $\varphi_n(x)$ подобраны так, чтобы каждый член суммы (2) удовлетворял граничным условиям. Подставим функцию (2) в уравнение (1) и применим к последнему процедуру Бубнова-Галеркина. Введя безразмерные величины и сохраняя при этом прежние обозначения, получим систему интегро-дифференциальных уравнений относительно w_n :

$$\sum_{n=1}^N \Delta_{kn} \ddot{w}_n + 2 \sum_{n=1}^N G_{Lg, kn} \dot{w}_n - \sum_{n=1}^N P_{Lg, kn} w_n + \alpha_{0k} (\bar{N}_0 - \pi P_o) w_k + \alpha_{0k}^2 (1 - R^*) w_k = 0, \quad (3)$$

$$w_n(0) = w_{0nm}; \quad \dot{w}_n(0) = \dot{w}_{0nm}; \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Здесь $\Delta_{kn} = \theta_{Lkn} + \theta_{gkn}$; $G_{Lg, kn} = \beta_L u_L \gamma_{Lkn} + \beta_g u_g \gamma_{gkn}$; $P_{Lg, kn} = \alpha_{0n} (\theta_{Lkn} u_L^2 + \theta_{gkn} u_g^2)$;
 $\theta_{gkn} = \int_0^{\bar{L}_1} \varphi_n(x) \varphi_k(x) dx$; $\theta_{Lkn} = \int_{L_1}^1 \varphi_n(x) \varphi_k(x) dx$; $\gamma_{gkn} = \frac{1}{n\pi} \int_0^{\bar{L}_1} \varphi_n'(x) \varphi_k(x) dx$; γ_{Lkn} ,
 $\beta_g, \bar{P}_i, u_L, u_g, \beta_L, \alpha_{0k}, \bar{N}_0, \bar{L}_1$ -безразмерные параметры.

Решение интегро-дифференциальных уравнений находится численным методом, основанным на использовании квадратурных формул. Дважды интегрируя систему (3) по t , запишем ее в интегральной форме, и с помощью рационального преобразования исключим сингулярные особенности интегрального оператора R^* . Затем, полагая $t=t_i, t_i=i\Delta t, i=1, 2, \dots (\Delta t=const)$ и заменяя интегралы квадратурными формулами трапеций для вычисления $w_{ikl}=w_{kl}(t_i)$, получим формулы для ядра Колтунова – Ржаницына ($R(t) = A \cdot \exp(-\beta t) \cdot t^{\alpha-1}, 0 < \alpha < 1$):

$$\sum_{n=1}^N (\Delta_{kn} + C_i G_{Lg, kn}) w_{in} = \sum_{n=1}^N \Delta_{kn} (w_{0n} + \dot{w}_{0n} t_i) + \sum_{n=1}^N G_{Lg, kn} w_{0n} t_i - \sum_{j=0}^{i-1} C_j \left\{ \sum_{n=1}^N G_{Lg, kn} w_{jn} - (t_i - t_j) \left(\sum_{n=1}^N P_{Lg, kn} w_{jn} + \alpha_{0k} (\bar{N}_0 - \pi \bar{P}_0) w_{jk} + \alpha_{0k}^2 \left(w_{jk} - \frac{A}{\alpha} \sum_{s=0}^j B_s \exp(-\beta t_s) w_{j-s, k} \right) \right) \right\}, \quad (4)$$

$i=1,2,3,\dots$; где C_j, B_s - числовые коэффициенты применительно к квадратурным формулам трапеции.

Таблица 1

Зависимость критической скорости двухфазного потока от физико-механических и геометрических параметров трубопровода

| A | α | β | β_L | β_g | \bar{L}_1 | \bar{N}_0 | \bar{P}_i | u_L | $u_{g,cr}$ | | | | | | |
|-------|----------|---------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------|------------|------|------|-------|---|-----|-------|
| 0 | | | | | | | | | 3.133 | | | | | | |
| 0.005 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 3.086 | | | | | | |
| 0.05 | | | | | | | | | 2.610 | | | | | | |
| 0.1 | | | | | | | | | 1.911 | | | | | | |
| | | | | | | | | | 2.159 | | | | | | |
| 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 2.760 | | | | | | |
| | 0.05 | | | | | | | | 2.942 | | | | | | |
| | 0.1 | | | | | | | | 3.062 | | | | | | |
| | 0.75 | | | | | | | | 3.031 | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 3.037 | | | | | | |
| | | 0.08 | | | | | | | 3.044 | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | | | | | | | 0.001 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 3.051 |
| | | | | | | | | | 0.1 | | | | | | 3.034 |
| | | | 0.7 | 3.038 | | | | | | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.007 | 0.27 | 0.025 | - | 0.3 | 3.041 | | | | | | |
| | | | | 0.1 | | | | | 3.055 | | | | | | |
| | | | | 0.5 | | | | | 3.042 | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.2 | 0.025 | - | 0.3 | 3.033 | | | | | | |
| | | | | | 0.3 | | | | 3.027 | | | | | | |
| | | | | | 0.32 | | | | 3.027 | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0 | - | 0.3 | 3.027 | | | | | | |
| | | | | | | 0.1 | | | 3.051 | | | | | | |
| | | | | | | 3 | | | 3.489 | | | | | | |
| | | | | | | 6 | | | 3.894 | | | | | | |
| | | | | | | 15 | | | 4.918 | | | | | | |
| 0.01 | 0.25 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.27 | 0.025 | 0.5 | 0.3 | 2.771 | | | | | | |
| | | | | | | | 1 | | 2.472 | | | | | | |
| | | | | | | | 2 | | 1.717 | | | | | | |
| | | | | | | | 2.5 | | 1.189 | | | | | | |

В таблице 1 приведены критические скорости потока в зависимости от физико-механических и геометрических характеристик трубопровода. Как видно из таблицы, критическая скорость u_{gcr} при значениях параметра $A = 0$ имеет значение 3.133, а при $A = 0.1$, составляет 1.911.

Коэффициент критического значения скорости газовой фазы для вязкоупругих трубопроводов уменьшается относительно упругих трубопроводов на 39%.

2.Vibration and dynamic stability of composite pipelines conveying a two-phase fluid flows. Engineering Failure Analysis. 2019, №104, Pp. 500-512. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.025>

В статье представлены результаты исследований процессов колебания трубопроводов, транспортирующих двухфазный поток. При исследовании колебаний трубопроводов с протекающей внутри газосодержащей жидкостью используется вязкоупругая модель теории балок и модель Винклера основания.

Уравнение движения трубопроводов, транспортирующих двухфазный поток пробки, с учетом свойств вязкости материала конструкций и оснований грунта имеет вид:

$$EI(1-R^*)\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(m_L U_L + m_g U_g)\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + (m_L U_L^2 + m_g U_g^2)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (m_L + m_g + m_p)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + k_1(1-R_1^*)w - \left[N_0 + \frac{E(1-R^*)A_0}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (5)$$

Изучено влияние скорости потока для жидкой фазы u_L на колебания трубы. На рис.2 представлены графики функции прогиба для трубопровода с учетом вязкоупругих свойств материала ($A=0.01$) и оснований грунта ($A_1 = 0.01$), при различных скоростях потока для жидкой фазы $u_L=1.4$ (кривая 1); $u_L=2.92$ (кривая 2). Для значений скорости потока для жидкой фазы $u_L=1.4$ амплитуда колебаний затухает. При увеличении скорости потока для жидкой фазы до $u_L=2.92$, колебания приобретают быстро возрастающие амплитуды. Скорость жидкой фазы превышает критическую скорость потока. Надо отметить, что колебания с возрастающими амплитудами могут привести к усталости конструкции.

Приведены исследования влияния параметра оснований k_w на колебательный процесс (рис.3). Как видно из графика, для обоих значений оснований грунта $k_w=4.8$ (кривая 1) и $k_w=5.1$ (кривая 2) при скорости $u_L = 1.5$ и $u_g=2.81$ проявляется динамическая неустойчивость, движение представляет собой колебания со стремительно возрастающими амплитудами.

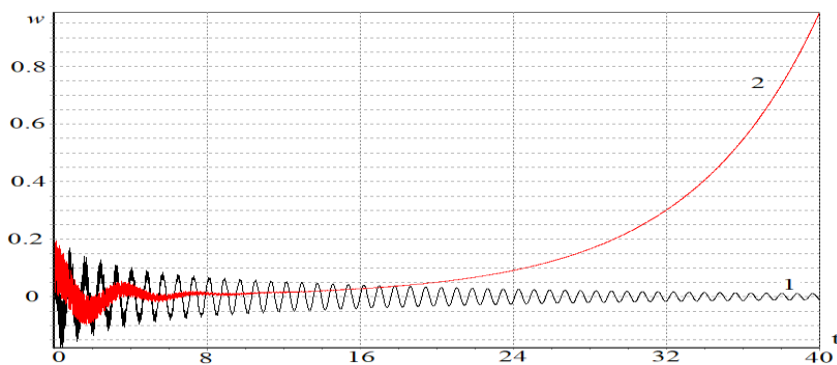


Рис.2. Зависимость $w(t)$ при различных скоростях потока для жидкой фазы $u_L=1.4$ (кривая 1); $u_L=2.92$ (кривая 2).

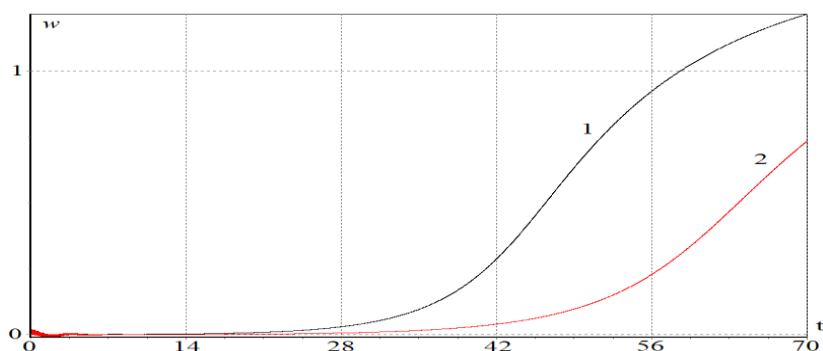


Рис.3. Зависимость прогиба трубы w от времени t при $k_w=4.8$ (кривая 1); $k_w=5.1$ (кривая 2).

3. The effect of two-parameter of Pasternak foundations on the oscillations of composite pipelines conveying gas-containing fluids. International Journal of Pressure Vessels and Piping №176 (2019) 103946. DOI: [10.1016/j.ijpvp.2019.103946](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.103946)

В работе исследовано влияние двухпараметрической вязкоупругости оснований Пастернака на колебания композиционных трубопроводов, транспортирующих двухфазный поток. При исследовании колебаний трубопроводов с протекающей внутри газосодержащей жидкостью используется вязкоупругая модель теории балок и модель основания Пастернака.

Интегро-дифференциальные уравнения движения газосодержащей жидкости в трубопроводе из композиционных материалов, имеют вид

$$\begin{aligned}
& EI(1-R^*)\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(m_L U_L + m_g U_g)\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + \\
& (m_L U_L^2 + m_g U_g^2)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (m_L + m_g + m_p)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \\
& (1-R_1^*)\left[k_1 w - k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right] - \left[N_0 + \frac{E(1-R^*)A_0}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 dx\right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0.
\end{aligned} \tag{6}$$

Здесь k_1 - коэффициент сжатия, связывающий интенсивность вертикального проседания грунта с его осадкой; k_2 - коэффициент сдвига.

Таблица 2

Значения параметра критической скорости для различных значений k_w .

| k_w | Doare and de Langre | Chellapilla and Simha | Present work |
|----------|---------------------|-----------------------|--------------|
| 1.00E+00 | 3.1577 | 3.15768 | 3.1565 |
| 1.00E+01 | 3.2989 | 3.29891 | 3.2996 |
| 1.00E+02 | 4.4723 | 4.47233 | 4.4789 |
| 2.00E+02 | 5.4894 | 5.48943 | 4.9040 |

Достоверность численных результатов доказывается решением тестового примера. Исследования показали, что в частном случае результаты численного моделирования для упругого трубопровода ($A = A_1 = 0$), транспортирующего однофазный поток жидкости, совпадает с результатами работы Chellapilla and Simha², Doare and de Langre³ (таблица 2).

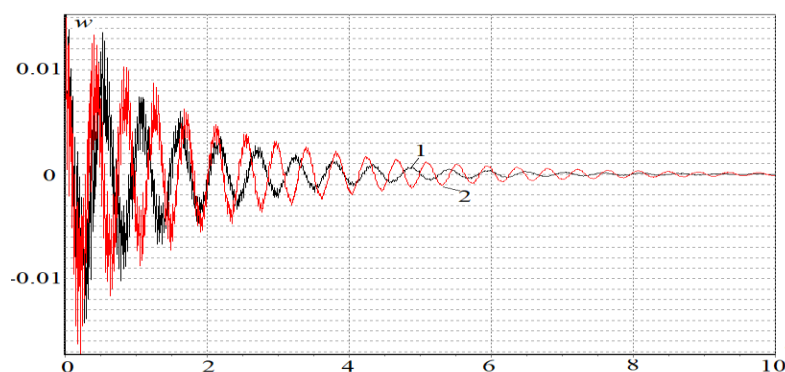


Рис.4. Зависимость прогиба трубы w от времени t при $k_w = k_p = 2.4$; (кривая 1); $k_w = k_p = 2.95$; (кривая 2).

² Kameswara Rao Chellapilla, H.S.Simha, Critical velocity of fluid-conveying pipes resting on two-parameter foundation. [Journal of Sound and Vibration. 302\(1-2\) \(2007\) 387-397.](#)

³ O. Doarer, E. de Langre, Local and global instability of fluid conveying pipes on elastic foundation. *Journal of Fluids and Structures.* 16 (2002) 1–14.

Исследовалось влияние значения двух параметров k_w и k_p оснований Пастернака (рис. 4). Из графика видно, что повышение жесткости оснований повлечет за собой увеличение частоты колебаний.

4.Numerical Simulation of Vibration Composite Pipelines Conveying Pulsating Fluid. International Journal of Applied Mechanics. 2019, Vol.11, No.09. 1950090 <https://doi.org/10.1142/S175882511950090X>

Рассмотрим прямой участок трубопровода длиной L в виде стержня, состоящего из композиционного материала, транспортирующего поток жидкости. Выберем прямоугольную систему координат так, чтобы ось x проходила через центры тяжести сечений трубы, а начало оси совместим с левым концом трубы. Перемещения точек оси трубопровода по оси ординат представляют неизвестную функцию прогибов $w(x, t)$. Предполагается, что движение плоское, а труба горизонтальна. Кроме того, в поперечной вибрации труба ведет себя как балка Эйлера-Бернулли и режим течения жидкости пульсирующий. Скорость пульсирующей жидкости $U_f(t)$ предполагается гармонически колеблющейся, и имеет следующий вид:

$$U_f(t) = U_0(1 + \mu_1 \cos \omega t), \quad (7)$$

здесь U_0 - постоянная скорости жидкости, μ_1 - коэффициент возбуждения, ω - частота пульсации жидкости. Эта пульсирующая скорость потока представляет собой параметрический член возбуждения в уравнении движения и может привести к неограниченному возрастанию амплитуды параметрических колебаний и наступлению явления параметрического резонанса.

Уравнение движения трубопроводов, транспортирующих поток жидкости, опирающегося на основании Hetenyi', с учетом свойств вязкости материала конструкций, осевых сил, внутреннее давление и вязкоупругих оснований Винклера имеет вид:

$$EI(1 - R^*) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2m_f U_f \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + m_f(L - x) \frac{\partial U_f}{\partial t} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (m_f + m_p) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \left[m_f U_f^2 - N_0 + A_p P_i(1 - 2\nu) \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (1 - R_1^*) \left[k_1 w + B \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right] = 0. \quad (8)$$

Здесь B - жесткость при изгибе сплошного слоя.

Изучено влияние коэффициента возбуждения на критическую скорость потока. Увеличение коэффициента возбуждения μ_1 приводит к существенному изменению $U_{f,cr}$. Исследования были проведены при $\mu_1=0.1$; $\mu_1=0.3$; $\mu_1=0.5$ и $\mu_1=0.75$ (таблица 3). Видно, что с увеличением коэффициента возбуждения критическая скорость потока жидкости уменьшается.

Таблица 3

Зависимость критической скорости потока жидкости от физико-механических и геометрических параметров трубопровода

| β_{fp} | μ_1 | ω | k_w | \bar{P} | \bar{N}_o | G | $U_{f,cr}$ |
|--------------|---------|----------|-------|-----------|-------------|---------------------|------------|
| 0.2 | 0.4 | 2.5 | 1 | - | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 2.271 |
| 0.4 | | | | | | | 2.265 |
| 0.7 | | | | | | | 2.251 |
| 0.1 | 0.1 | 5 | 1 | - | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 2.737 |
| | 0.3 | | | | | | 2.447 |
| | 0.5 | | | | | | 1.913 |
| | 0.75 | | | | | | 1.698 |
| 0.1 | 0.4 | 5 | 1 | - | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 2.363 |
| | | 7 | | | | | 2.018 |
| | | 15 | | | | | 1.669 |

Изучено влияние параметра частоты пульсации жидкости на критическую скорость $U_{f,cr}$. Расчеты были проведены при $\omega=5, 7$ и 15 . Как видно из табл. 2, критическая скорость $U_{f,cr}$ при значениях частота пульсации жидкости $\omega=5$ имеет значение 2.363, а при $\omega=15$, составляет 1.669. При $\omega=5$ и $\omega=15$ критические скорости потока отличаются друг от друга на 29.4%.

Особый интерес представляют результаты вычислений, приведенные на рис. 5. Они относятся к случаю, когда коэффициент возбуждения принимает значение: $\mu_1=0.1$ (кривая 1), $\mu_1=0.5$ (кривая 2). Было принято, что безразмерная частота колебаний в этом случае составляла $\omega=5$. Как видим, для трубопровода с пульсирующей жидкостью амплитуда колебаний со временем затухает (кривые 1, 2). Если же коэффициент возбуждения возрастает до значения $\mu_1=0.7$, то наблюдаются колебания с резко возрастающей амплитудой, которые могут привести к возникновению и накоплению повреждений в конструкции.

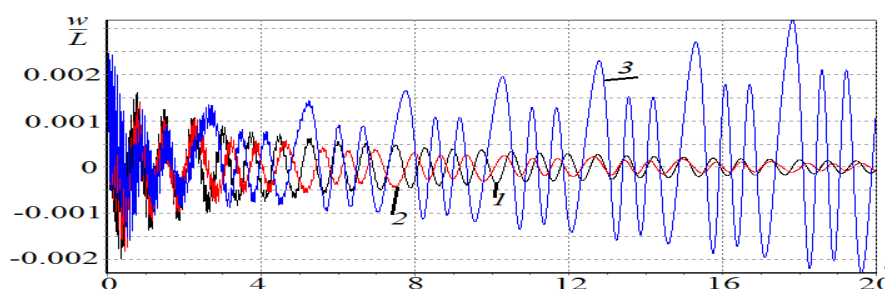


Рис.5. Зависимость прогиба трубы w от времени t при различных значениях коэффициента возбуждения μ_1 : $\mu_1=0.1$ (1); $\mu_1=0.5$ (2); $\mu_1=0.7$ (3).

[5.Dynamic analysis of the suspended composite pipelines conveying pulsating fluid. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 75 \(2020\) 103148. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103148](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103148)

Нелинейное уравнение движения трубопроводов, транспортирующих поток жидкости, опирающегося на основании Hetenyi' с учетом свойств вязкости материала конструкций, осевые усилия, внутреннее давление и вязкоупругих оснований Винклера имеет вид:

$$EI(1-R^*)\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2m_f U_f \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + (m_f + m_p) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \left[m_f U_f^2 \frac{\lambda L}{4d} + m_f (L-x) \frac{\partial U_f}{\partial t} - \frac{EA_0}{2L} (1-R^*) \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \left[m_f U_f^2 - N_0 + A_p P_i \right] \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (1-R_1^*) \left[k_1 w + B \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right] = 0. \quad (9)$$

Были исследования влияние параметра силы сопротивления γ_{Re} на критическую скорость потока для пульсирующих и ламинарных течений. С ростом параметра γ_{Re} (или уменьшением значение числа Рейнольдса) уменьшается критическая скорость потока. При больших числах Рейнольдса (или малых сил сопротивления) ламинарный режим течения становится неустойчивым и переходит в турбулентный режим. Числа Рейнольдса, при которых определена критическая скорость потока жидкости является критическим значением Рейнольдса. Значение силы сопротивления, равным 0.0234375; 0.046875; 0.375; 0.75; 1.5; 1.875, соответствует значения критической скорости потока, равные 2.264; 2.237; 1.832; 1.624; 1.451; 1.353. В таблице 4 представлены аналогичные результаты для ламинарных течений. В этом случае тоже с возрастанием параметра силы сопротивления γ_{Re} уменьшается критическая скорость потока.

Таблица 4

Зависимость критической скорости потока жидкости от физико-механических и геометрических параметров трубопровода

| β_{fp} | k_w | \bar{p} | \bar{N}_o | G | γ_{Re} | μ_1 | $U_{f,cr}$ | |
|--------------|-------|-----------|-------------|---------------------|---------------|---------|--------------|--------------|
| 0.32 | 1 | 1 | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 0.0234375 | 0.4 | 2.264 | |
| | | | | | 0.046875 | | 2.237 | |
| | | | | | 0.375 | | 1.832 | |
| | | | | | 0.75 | | 1.624 | |
| | | | | | 1.5 | | 1.451 | |
| | | | | | 1.875 | | 1.353 | |
| 0.32 | 1 | 1 | 1 | $8.2 \cdot 10^{-4}$ | 0.1875 | 0 | 2.795 | |
| | | | | | | | 0.1 | 2.566 |
| | | | | | | | 0.2 | 2.315 |
| | | | | | | | 0.3 | 2.201 |
| | | | | | | | 0.4 | 1.969 |
| | | | | | | | 0.45 | 1.920 |

6. Numerical simulation of vibration of composite pipelines conveying fluids with account for lumped masses. International Journal of Pressure Vessels and Piping 179 (2020) 104034

В работе исследуются задачи о вибрации трубопроводов из композиционных материалов с учетом сосредоточенных масс. Разработана математическая модель движения трубопроводов, транспортирующих поток жидкости, опирающихся на основание Винклера с учетом сосредоточенных масс. Для однородного стержня, нагруженного в общей сложности H точечных масс M_r расположенных в точке x_r , распределение масс имеет вид

$$M(x) = m_f + m_p + \sum_{r=1}^H M_r \delta(x - x_r) \quad (11)$$

где δ - дельта-функция Дирака; m_p – масса трубы на единицу длины.

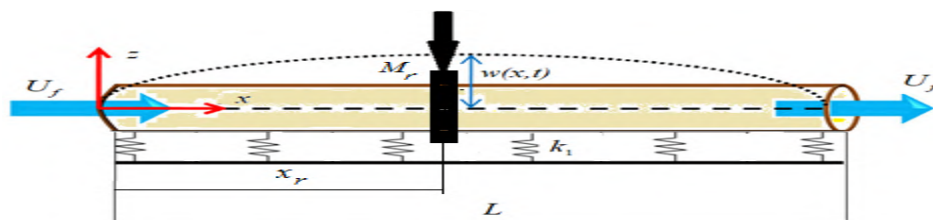


Рис. 7. Трубопровод с сосредоточенными массами.

Особый интерес представляют результаты вычислений, приведенные на рис.8. Они относятся к случаю, когда трубопровод без учета и с учетом сосредоточенными массами. График $w(t)$ рис.8 (кривая 2) иллюстрирует картину движения центральной точки трубопровода с учетом сосредоточенными массами. Как видим, при наличии сосредоточенных масс $M_1=100$ (кривая 2) движения является неустойчивым, а при отсутствие сосредоточенных масс $M_1=0$ – движение конструкции характеризуется медленно затухающими колебаниями.

Исследовано влияние места расположения сосредоточенных масс на колебания трубопровода (рис. 9). Сосредоточенные массы были расположены в следующих точках: $x_1=L/2$ (кривая 1); $x_1=L/3$ (кривая 2), $x_1=L/4$ (кривая 3). Как видно, по мере удаления сосредоточенной массы от центра трубопровода вдоль длины частота колебаний увеличивается.

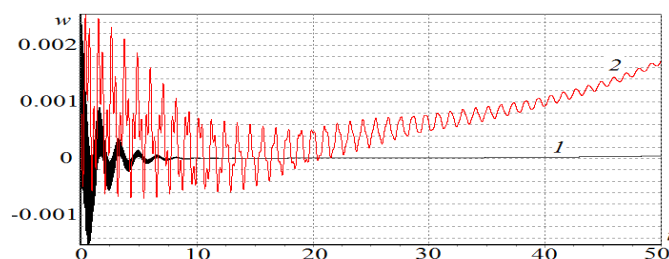


Рис.8. $M_1=0$ (1); $M_1=100$ (2); $A=0.02$; $\alpha=0.25$; $\beta=0.05$; $A_1=0.15$;
 $\alpha_1=0.2$; $\beta_1=0.01$; $\beta_{fp}=0.32$; $k_w=10$; $\bar{N}_o = 2$; $\bar{P} = 5$; $U_f = 2.67$.

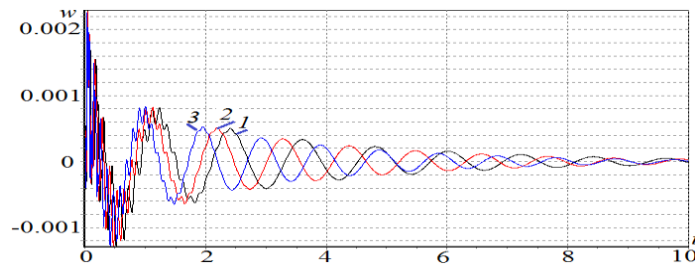


Рис.9. $x_r=L/2$ (1); $x_r=L/3$ (2); $x_r=L/4$ (3); $A=0.02$; $\alpha=0.25$; $\beta=0.05$; $A_1=0.15$; $\alpha_1=0.2$; $\beta_1=0.01$; $\beta_{fp}=0.32$; $M_1=0.1$; $\gamma_{Re} = 0.1875$; $\bar{P} = 5$; $\bar{N}_o = 2$.

7. Numerical study of the effect of viscoelastic properties of the material and bases on vibration fatigue of pipelines conveying pulsating fluid flow. Engineering Failure Analysis. 2020, Vol.115.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104635>

В статье приведены результаты математического моделирования колебательных процессов вязкоупругих трубопроводов с учетом стационарных внешних нагрузок.

На рис. 10 представлены графики функции прогиба композиционного трубопровода с вязкоупругим основанием. Расчеты были проведены при $q=2$ (кривая 1), $q=5$ (кривая 2) и $q=8$ (кривая 3). При вычислениях принимались следующие значения реологических параметров: $A=0.1$; $\beta=0.05$; $A_1=0.1$; $\alpha_1=0.25$; $\beta_1=0.05$. Как видно из графиков, при увеличении параметра внешней нагрузки наблюдаются колебания с резко возрастающей амплитудой, подобные вибрации является нежелательными, так как приводят к зарождению и накоплению повреждений в конструкции.

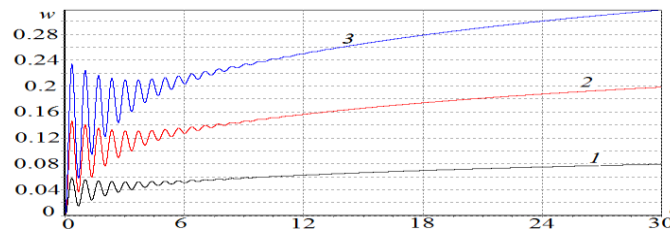


Рис.10. $q_1 = 2$ (кривая 1); $q_1 = 5$ (кривая 2); $q_1 = 8$ (кривая 3).

8. Numerical modeling of vibration fatigue of viscoelastic pipelines conveying pulsating fluid flow. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing. Volume 11, Issue 03 (June 2020) 2050024

В статье приведены результаты математического моделирования колебательных процессов вязкоупругих трубопроводов транспортирующих пульсирующий поток жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задачи разработка математических моделей на основе наследственной теории вязкоупругости, вычислительных алгоритмов и программных средств для оценки динамического поведения вязкоупругих трубопроводов. В том числе получены следующие научные результаты:

1. Разработана математическая модель колебаний вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих двухфазные потоки с учетом вязкоупругих оснований Винклера и двух параметрических оснований Пастернака.

2. Разработана математическая модель вибрации композиционных трубопроводов, транспортирующих поток жидкости, с учетом свойств вязкости материала конструкций и оснований трубопровода, силы сопротивления и сосредоточенных масс.

3. Разработана математическая модель движения трубопроводов, транспортирующих пульсирующий поток жидкости, опирающегося на основание Hetenyi', с учетом осевых усилий, внутреннее давление, вязкоупругих оснований Винклера и внешних сил.

4. Разработан вычислительный алгоритм для решения линейных и нелинейных задач расчета колебательных процессов трубопроводов с протекающим двухфазным потоком. На основе разработанного вычислительного алгоритма создан пакет прикладных компьютерных программ, позволяющий исследовать колебательные процессы вязкоупругих трубопроводов с протекающей двухфазной газосодержащей жидкостью.

5. Разработан вычислительный алгоритм, основанный на исключении особенностей интегро-дифференциальных уравнений со слабо-сингулярными ядрами, для решения задач колебания композиционных трубопроводов с протекающей пульсирующей жидкости.

6. Исследованы устойчивость и амплитудно-временные характеристики вибрации композиционных трубопроводов с протекающей в ней пульсирующей жидкостью при широких диапазонах изменения параметров деформируемых систем и потока жидкости.

7. Численно исследовано влияние двух параметрических вязкоупругих оснований Пастернака на колебания композиционных трубопроводов, транспортирующих двухфазный поток.

8. При численном моделировании линейных и нелинейных задач исследован ряд новых динамических эффектов:

- показано, что учет вязкоупругих свойств материала конструкции и оснований трубопровода приводит к уменьшению критической скорости потока на 30-50%;

- выявлено, что учет вязкоупругих свойств материала трубопровода приводит к уменьшению амплитуды и частоты колебаний на 20-40%.

- выявлено, что увеличение длины зоны пузырька газа приводит к уменьшению амплитуды и частоты колебаний трубопровода;

- установлено, что увеличение параметров оснований Пастернака, параметра оснований Винклера, параметра сингулярности и числа Рейнольдса приводит к росту критической скорости потока;

- установлено, что увеличение значения частоты пульсации жидкости, коэффициента возбуждения пульсирующего течения, параметры сосредоточенной массы и внутреннего давления приводит к уменьшению критической скорости потока на 25-40%;

- показано, что увеличение коэффициента оснований G , характеризующий жесткость при изгибе сплошного слоя способствует повышению относительной жесткости системы и росту критической скорости потока.

– выявлено, что параметр растягивающих усилий в продольном направлении оказывает на трубопровод стабилизирующее влияние.

- показано, что удаления сосредоточенной массы от центра вдоль длины трубопровода частота колебаний увеличивается.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.13/30.12.2019.T.07.01 AT TASHKENT UNIVERSITY
OF INFORMATION TECHNOLOGIES**

**TASHKENT INSTITUTE OF IRRIGATION AND AGRICULTURAL
MECHANIZATION ENGINEERS**

**DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS, METHODS AND
ALGORITHMS FOR THE EVALUATION OF DYNAMIC BEHAVIOR OF
PIPELINES CONVEYING FLUID**

**05.01.07 – Mathematical modeling, numerical methods and
program complexes**

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

Tashkent-2021

The subject of doctor of philosophy (PhD) dissertation is registered by the Higher Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2020.2.PhD/T1737

The PhD presentation has been prepared at the Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers.

The abstract of the presentation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is placed on web-page of Scientific Council at the address (www.tuit.uz) and information-education portal «ZiyoNet» at the address (www.ziynet.uz)

Scientific adviser: **Khudayarov Bakhtiyar Alimovich**
Doctor of Technical Sciences

Official opponents: **Polatov Asxad Muxamedjonovich**
Doctor of Physical-Mathematical Sciences, Professor

Anarova Shaxzoda Amanboevna
Doctor of Technical Sciences, Docent

Leading organization: **Tashkent State Technical University**

The defense of presentation will take place “ 8 ” april 2021 y. at 14⁰⁰ on the meeting of Scientific council No. DSc.13/30.12.2019.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

The presentation can be reviewed at the Information Resource Centre of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under No A/2639). (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52).

Abstract of presentation sent out on “ 26 ” march 2021 y.
(mailing report No 5 on “ 26 ” february 2021 y.)



R.Kh.Khamdamov
Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

F.M.Nuraliev
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Docent

Sh.A. Sadullaeva
Chairman of the academic seminar under the
scientific council awarding scientific degrees,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

INTRODUCTION (abstract of presentation)

The aim of research work is to develop mathematical models, methods, computational algorithms, and computer programs for evaluating the dynamic processes of viscoelastic pipelines conveying fluids.

The object of the research work is the oscillatory processes of viscoelastic pipelines conveying fluids.

Scientific novelty of research work is as follows:

development of a mathematical model of the movement of pipelines, conveying a constant and pulsating fluid flow, taking into account the concentrated masses, internal and external forces;

Development of a mathematical model of the process of vibration of viscoelastic pipelines conveying two-phase fluids;

Computational algorithms have been developed for solving the integral-differential equations of the oscillatory processes of viscoelastic pipelines and a method for determining the critical velocities of fluid flows in pipelines;

a set of applied programs was developed to study the influence of the viscoelastic properties of the pipeline material and the foundations of the Winkler, Pasternak and Hetenyi's models, as well as to determine the critical flow rate in viscoelastic pipelines.

Implementation of the research results. Based on the development of mathematical models, methods and algorithms for the evaluation of dynamic behavior of pipelines conveying fluid:

Used in the Chimkurgan reservoir to assess the effect of various mixed liquids on the vibration process of the drain pipe, the influence of external forces on the drain pipe of the reservoir and the vibrations of the two-phase fluid flow of the soil base of the pipeline (Reference of the Ministry of Water Resource of the Republic of Uzbekistan №02/25-543 on February 13, 2020) The results of scientific research have reduced the time required for engineering calculations, to determine the strength of pipes and their resistance to various external influences by 1.4 times;

Introduced in the drain pipes of the Andijan reservoir to assess the effect of two-phase liquids and rheological parameters of the soil base and pipeline material (Reference of the Ministry of Water Resource of the Republic of Uzbekistan №02/25-543 on February 13, 2020). The application of the results of scientific research allowed us to determine the variable flow rate that occurs in the outlet pipelines of the reservoir, the change in pressure in the pipe and the suitability of the pipes.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I, Part I)

1. Худаяров Б.А., Комилова Х.М. Численное моделирование колебаний вязкоупругих трубопроводов, транспортирующих двухфазную среду в режиме пробкового течения // Вестник Томского Государственного Университета Математика и механика. 2019, №61. С.95-110. (05.00.00; №3, **Cite Score:0.46**).

2. Khudayarov B.A., Komilova Kh.M. Vibration and dynamic stability of composite pipelines conveying a two-phase fluid flows // Engineering Failure Analysis. 2019, Vol.104. Pp. 500-512. (05.00.00; №3, **Cite Score:2.75; IF=2.203**).

3. Khudayarov B.A., Komilova Kh.M., Turaev F.Zh. The effect of two-parameter of Pasternak foundations on the oscillations of composite pipelines conveying gas-containing fluids // International Jurnal of Pressure Vessels and Piping. 2019, Vol.176. 103946. (05.00.00; №3, **Cite Score:2.41; IF=2.075**).

4. Khudayarov B.A., Komilova Kh.M., Turaev F.Zh. Numerical Simulation of Vibration Composite Pipelines Conveying Pulsating Fluid. International Journal of Applied Mechanics. 2019, Vol.11(09). 1950090, (05.00.00; №3, **Cite Score:2.38**).

5. Khudayarov B.A., Komilova Kh.M., Turaev F.Zh. Dynamic analysis of the suspended composite pipelines conveying pulsating fluid. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, Vol.75. 103148, (05.00.00; №3, **Cite Score:8.8; IF=3.841**).

6. Khudayarov B.A., Komilova Kh.M., Turaev F.Zh., Aliyarov J.A. Numerical simulation of vibration of composite pipelines conveying fluids with account for lumped masses. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2020, Vol.179. 104034, (05.00.00; №3, **Cite Score:3.1; IF=2.23**).

7. Khudayarov B.A., Komilova Kh.M., Turaev F.Zh. Numerical study of the effect of viscoelastic properties of the material and bases on vibration fatigue of pipelines conveying pulsating fluid flow. Engineering Failure Analysis. 2020, Vol.115. 104635. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104635> (05.00.00; №3, **Cite Score:2.75; IF=2.897**).

8. Komilova Kh.M. Numerical modeling of vibration fatigue of viscoelastic pipelines conveying pulsating fluid flow. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing(IJMSSC), Volume 11, Issue 03 (June 2020) 2050024. <https://doi.org/10.1142/S1793962320500245> (05.00.00; №3, **Cite Score:0.79; IF=0.67**).

II бўлим (Часть II, Part II)

9. Khudayarov B.F., Komilova Kh.M., Turaev F.Zh. Numerical Modeling of pipes conveying gas-liquid two-phase flow. E3S Web of Conferences 97, 2019, 05022 .

10. Худаяров Б.А., Комилова Х.М., Тураев Ф.Ж. Пульсацияли суюқлик оқаётган композицион кувурнинг вибрацияси // ЎзР Адлия вазирлиги хузуридаги Интеллектуал мулк агентлиги. № DGU 07266. 06.12.2019.

11. Худаяров Б.А., Комилова Х.М., Тураев Ф.Ж. Икки фазали суюқликларни ташувчи кувурларнинг динамик ҳисоби // ЎзР Адлия вазирлиги хузуридаги Интеллектуал мулк агентлиги. № DGU 06858. 28.08.2019.

12. Худаяров Б.А., Комилова Х.М., Тураев Ф.Ж. Численное моделирование вибраций композитных трубопроводов, транспортирующих двухфазный поток жидкости // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2020, № 2(26). С. 58–77.

13. Худаяров Б.А., Комилова Х.М. Компьютерное моделирование колебаний трубопровода с пульсирующим потоком жидкости // Журнал “Irrigatsiya va Melioratsiya”. 2018, №4(14). С. 69-75.

14. Khudayarov B.F., Komilova Kh.M. Mathematical Model of Pipeline Oscillations on a Viscoelastic Base Transporting a Two-Phase Fluid // The 6th International Conference on Mathematics and Computations. 24-26 april 2019, Zarqa University, Jordan, Pp. 17.

15. Комилова Х.М., Тураев Ф.Ж. Моделирование колебаний композиционных трубопроводов с учетом двухконстантного основания Пастернака // Сборник девятнадцатой международной конференции "Проблемы информатики и моделирования (ПИМ-2019)", 11 - 16 сентября 2019 г. Украина, Одесса, 2019. С.51.

16. Худаяров Б.А., Комилова Х.М., Тураев Ф.Ж. Моделирование колебания композитных трубопроводов, транспортирующих газосодержащие жидкости // “Агросаноат мажмуаси учун фан, таълим ва инновация, муаммолар ва истиқболлар” мавзусидаги халқаро илмий-амалий анжуман, 2019. 212-214 б.

17. Комилова Х.М. Суюқлик-газ аралашмаси оқаётган кувур тебраниши жараёнини математик моделлаштириш // “Агросаноат мажмуаси учун фан, таълим ва инновация, муаммолар ва истиқболлар” мавзусидаги халқаро илмий-амалий анжуман, 2019 й. 454-458 б.

18. Комилова Х.М. Икки фазали суюқлик оқимидаги транспортировка қилувчи кувур тебранишини математик моделлаштириш // “Қишлоқ ва сув хўжалигининг замонавий муаммолари” мавзусидаги аънавий XVIII- ёш олимлар, магистрантлар ва иқтидорли талабаларнинг илмий амалий анжумани мақолалар тўплами, 2019 й. 18-19 апрель. Тошкент, ТИҚХММИ, 2019. Том №3. 239-242 б.

19. Комилова Х.М. Моделирование колебаний вязкоупругих трубопроводов с учетом внешних сил // “Қишлоқ ва сув хўжалигининг замонавий муаммолари” мавзусидаги аънавий XIX- ёш олимлар, магистрантлар ва иқтидорли талабаларнинг илмий амалий анжумани мақолалар тўплами 2020й. 14-15 май. Тошкент, ТИҚХММИ.

Тақдимнома «ИРРИГАЦИЯ ВА МЕЛИОРАЦИЯ» илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус, инглиз (резюме) тилларидаги матнлари мослиги текширилди.

Бичими 60x84¹/₁₆. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табоғи 2,94. Адади 100 нусха. Буюртма № 20.

ТИҚХММИ босмахонасида чоп этилди.
100000, Тошкент, Қори-Ниёзий кўчаси, 39-уй.