

**МЕХАНИКА ВА ИНШООТЛАР СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ  
ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.02/30.12.2019.Т/ФМ.61.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**М.Т.ЎРОЗБАЕВ НОМИДАГИ МЕХАНИКА ВА ИНШООТЛАР  
СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ ИНСТИТУТИ**

**ХУСАИНОВ РАХМАТЖОН БАХРАМБАЕВИЧ**

**ЕР ОСТИ ҚУВУРИНИНГ ГРУНТ БИЛАН ЁПИШҚОҚ-ЭЛАСТИК-  
ПЛАСТИК ЎЗARO ТАЪСИРИ СЕЙСМОДИНАМИКАСИ (ЧИЗИҚЛИ  
ВА ЧИЗИҚСИЗ МАСАЛАЛАР)**

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ  
(PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)  
диссертацияси автореферати мундарижаси  
Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по  
физико-математическим наукам  
Contents of Dissertation Abstract of Doctor of Philosophy (PhD)  
on Physical-mathematical sciences**

Хусаинов Рахматжон Бахрамбаевич  
Ер ости қувурининг грунт билан ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро  
таъсири сейсמודинамикаси (чизиқли ва чизиқсиз масалалар).....3

Хусаинов Рахматжон Бахрамбаевич  
Сейсמודинамика вязко-упруго-пластического взаимодействия  
подземного трубопровода с грунтом (линейные и нелинейные задачи)..21

Khusainov Rakhmatjon Bakhrambayevich  
Seismodynamics of visco-elasto-plastic interaction underground pipeline with  
soil (linear and non-linear problems).....39

Эълон қилинган ишлар рўйхати  
Список опубликованных работ  
List of published works.....43

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

---

**М.Т.ЎРОЗБАЕВ НОМИДАГИ МЕХАНИКА ВА ИНШОТЛАР  
СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ ИНСТИТУТИ**

**ХУСАИНОВ РАХМАТЖОН БАХРАМБАЕВИЧ**

**ЕР ОСТИ ҚУВУРИНИНГ ГРУНТ БИЛАН ЁПИШҚОҚ-ЭЛАСТИК-  
ПЛАСТИК ЎЗARO ТАЪСИРИ СЕЙСМОДИНАМИКАСИ (ЧИЗИҚЛИ  
ВА ЧИЗИҚСИЗ МАСАЛАЛАР)**

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2021

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2018.2.PhD/FM233 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси М.Т.Ўрозбаев номидаги Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида ([www.instmech.uz](http://www.instmech.uz)) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим портали ([www.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz)) манзилларига жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Рашидов Турсунбой Рашидович**

техника фанлари доктори, профессор, академик

**Расмий оппонентлар:**

**Сафаров Исмоил Иброҳимович**

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Абдиқаримов Рустамхан Алимханович**

физика-математика фанлари доктори

**Етакчи ташкилот:**

**Самарканд Давлат университети**

Диссертация ҳимояси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 рақамли Илмий кенгашининг 2021 йил «16» июлдаги соат 10<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси, 33, 1-мажлислар зали. Тел.: (99871) 262-71-52; Факс: +(99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

Диссертация билан Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (№ 9 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел.: +(99871) 262-71-52).

Диссертация автореферати 2021 йил «28» июнь куни тарқатилди.  
(2021 йил «16» июндаги №5 рақамли реестр баённомаси).



Handwritten signatures in blue ink, including the signature of M. Mirsaidov and others.

**М. Мирсаидов**

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

**М.К.Ўсаров**

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

**Р.А.Абиров**

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д.

## **КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда нефт ва газ қазиб ҳажми ва географияси ва унинг ташилишининг ошиши, асосан ер ости коммуникация тизимларидан фойдаланиладиган шаҳарлар ва шаҳар туридаги қишлоқларнинг тезлик билан ўсиши, ер ости қувурлари тизимини кенг миқёсда қуришга, шу билан бирга юқори сейсмикликга эга ҳудудларда ер ости қувурларини зилзилабардошлигини ошириш муҳим масалалардан бири бўлиб ҳисобланмоқда. Шу жиҳатдан, дунёда ер ости қувурларини сейсמודинамикаси масалаларига сонли усулларни қўллаш, ечиш усулларини такомиллаштиришга, алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада, жумладан аниқ бир мақсадга йўналтирилган илмий тадқиқотларни амалга ошириш муҳим масала ҳисобланади, бунда ҳаётни таъминловчи ер ости тизимларининг грунт билан ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсирида, ер ости қувурларининг турли хил кўринишдаги сейсмик таъсирларида КДҲни ҳисоблашга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда шаҳарлар, айниқса катта шаҳарларнинг нормал фаолияти кўп миқдорда энергетик ва транспорт тизимлари, сув таъминоти ва канализация тизимларининг узлуксиз ишлашига боғлиқ, уларнинг зилзила натижасида шикастланганда, уларда иккиламчи бузилишларни пайдо бўлиши, йирик газ ва нефт қувурлари шикастланиши натижасида ёнғин пайдо бўлиши ва экологик муҳитни хавфли ифлосланишини келтириб чиқариши мумкинлиги ер ости қувурларини шубҳасиз ишончли лойиҳалаш ва қуриш усулларини такомиллаштиришга йўналтирилган мақсадли илмий тадқиқот ишлари олиб боришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада ер ости қувурларига сейсмик таъсирнинг турли хил кўринишда бўлишини инобатга олиб, қувурни ўраб турган грунт ҳаракатини турли хил аналитик функциялар кўринишида олиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Шу билан бирга ер ости қувурининг грунт билан ўзаро таъсирлашиш моделини ёпишқоқ-эластик-пластик кўринишда олганда, кучланганлик деформацияланганлик ҳолати мустаҳкамлигини баҳолаш ва башорат қилиш усулларини ишлаб чиқиш зарур вазифалардан ҳисобланади.

Ҳозирда республикамизда шаҳар ва қишлоқларни узлуксиз ичимлик суви билан таъминлаш мақсадида ичимлик суви, канализация, ҳамда иқтисодиётнинг муҳим қон томири бўлган нефт ва газ қувурларининг узлуксиз ишлашини таъминлашга доир чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...ишлаб чиқаришни модернизация қилиш, техник ва технологик жиҳатдан янгилаш, ишлаб чиқариш, транспорт-коммуникация ва ижтимоий инфратузилма лойиҳаларини амалга оширишга қаратилган фаол инвестиция сиёсатини олиб бориш...» аҳолининг коммунал-маиший хизматлар билан таъминланиш даражасини ошириш, энг аввало, янги ичимлик суви тармоқларини қуриш, тежамкор ва самарали замонавий технологияларни босқичма-босқич жорий этиш орқали қишлоқ жойларда аҳолининг тоза ичимлик суви билан

таъминлашни тубдан яхшилаш...»<sup>1</sup> вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан ер ости қувурларининг кучланганлик деформацияланганлик ҳолатини аниқлаш усулларини яратиш, ер ости қувурларини сейсмик таъсирга мустаҳкамлигини ҳисоблайдиган усулларни ишлаб чиқиш ва ушбу йўналишда илмий ва амалий аҳамиятга эга илмий-тадқиқот ишларини ривожлантириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 9 августдаги ПҚ-3190-сон «Сейсмология, сейсмик чидамли қурилиш ҳамда Ўзбекистон Республикаси аҳолиси ва ҳудудининг сейсмик хавфсизлиги соҳасида илмий тадқиқотлар олиб боришни такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2017 йил 30 июндаги ПҚ-3107-сон «Нефть-газ соҳасининг бошқарув тизимини такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2017 йил 8 ноябрдаги ПҚ-3379-сон «Энергия ресурсларидан оқилона фойдаланишни таъминлаш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2018 йил 2 февралдаги ПҚ-3502-сон «2018 — 2022 йилларда аҳоли пунктларини бош режалар билан таъминлаш, лойиҳа ташкилотлари фаолиятини яхшилаш, шунингдек, шаҳарсозлик соҳасида мутахассислар тайёрлаш сифатини ошириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2020 йил 30 июльдаги ПҚ-4794-сон «Ўзбекистон Республикаси аҳолиси ва ҳудудининг сейсмик хавфсизлигини таъминлаш тизимини тубдан такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти маълум даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устивор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV. «Математика, механика, ва информатика» ва XIV. «Сейсмология, биналар ва иншоотлар сейсмик хавфсизлиги ва қурилиш» устувор йўналишлари доирасида бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Ҳозирги вақтда сейсмик юкланишлар таъсиридаги ер ости қувурларининг сейсмик мустаҳкамлигини ҳисоблаш усулларини такомиллаштириш бўйича қатор илмий тадқиқот ишлар олиб борилган, жумладан: M.J. O'Rourke, L.R. Wang, N.M. Newmark, E.I. Nnadi, T. Takahashi, T. Tanaka, D. Wijewickreme, K. Yoshizaki, X.L. Liu, Д.Д. Баркан, В.А. Ильичев, Я.М. Айзенберг, Ш.Г. Напетваридзе, А.Г. Назаров, Р.М. Мукурдумов, А.Б. Айнбиндер, А.С. Гехман, М.Ш. Исраилов, А.А. Александров, Р.А. Гумеров, Э.Н. Фигаров ва бошқалар томонидан илмий-тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Маҳалий олимлардан ер ости тизимлари сейсмик мустаҳкамлиги соҳасининг ривожланишида бир қатор олимлар томонидан тадқиқотлар олиб борилган,

<sup>1</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармони.

жумладан, академик Т.Р. Рашидов томонидан мураккаб тизимли ер ости иншоотлари сейсмик мустаҳкамлигининг динамик назарияси яратилган. А.Абдусаттаров, Р.А.Абдикаримов, Р.А.Абиров, А.Каюмов, Е.Н.Колмакова, Ш.М.Маматкулов, Б.М.Мардонов, А.Х.Маткаримов, М.Мирсаидов, Я.Н. Мубораков, С.Мухамедова, В.А. Омельяненка, С.Ф.Проскурина, Х.С.Сагдиев, К.Д.Салямова, И.Сафаров, Ш.М. Сибукаев, Т.Т.Собиров, К.С.Султанов, З.Р.Тешабаев, М.К. Усаров, Г.Х.Хожметов, А.А.Халджигитов, Б.Э.Хусанов, Т.Юлдашев, А.Юсупов ва бошқалар, бу соҳада турли йилларда грунт хоссаси, кўмилиш чуқурлиги, иншоотнинг геометрик ўлчамлари шунингдек тўлқин табиатли таъсир ва грунт муҳити билан, қувурнинг ўзаро таъсирини ҳисобга олувчи турли масалалар устида изланишлар олиб борганлар.

Бугунги кунда фойдаланилаётган меъёрий ҳужжатда (ҚМҚ 2.01.03-96 «Зилзилавий ҳудудларда қурилиш», «Ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқлари» IV бўлими) кўмилган қувурлар ва шу каби ер ости иншоотларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблаш муаммолари ҳозирги вақтгача етарлича ҳал этилмаган. Хорижий мамлакатларнинг ер ости иншоотлари сейсмодинамикаси бўйича тадқиқотлари таҳлили, ҳисоблаш усулларини етарли эмаслигини кўрсатди.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти М.Т. Ўрозбоев номидаги Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг илмий тадқиқот ишлари режасининг ФА-Ф-4-006 - «Ихтиёрий йўналган сейсмик кучлар таъсиридаги текисликда ва фазовий жойлашган ер ости қувурлар тизимининг сейсмодинамикаси» (2017-2020) ва ФА-Атех-2018-67 - «Зилзилаларда йиғилган реал маълумотларга асосланган сейсмик кучлар таъсиридаги ер ости қувурларининг реакциясини баҳолаш ва уларни амалиётга татбиқи» (2018-2020) мавзуларидаги лойихалар доирасида бажарилган

**Тадқиқотнинг мақсади** контактда ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсир хусусиятига эга ер ости қувурининг, сейсмик тўлқин ҳаракатланувчи синус, ҳаракатланувчи синус ярим тўлқини импульси ва учбурчак шаклидаги импульс таъсирларида кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини аниқлашдан иборат. Ундан ташқари ер ости қувури кесимларида ҳосил бўладиган кўчиш ва деформацияга узел массаси, ўзаро таъсир эластик ва ёпишқоқлик коэффициентлари, грунт тебраниш даври ва тезлиги ва импульс шаклининг таъсирини аниқлаш усулларини ишлаб чиқишдан иборат

#### **Тадқиқотнинг вазифалари:**

қувур ва грунт орасида эластик ва ёпишқоқ-эластик ўзаро таъсирларида, ер ости қувурида ҳосил бўладиган зўриқишларни сонли ҳисоблаш усулларини ишлаб чиқиш. Грунт деформацияси узлукли функция кўринишида бўлганда, чекли айирмалар усулида, аниқлиги юқори схемани танлаш;

ер ости қувурида ҳосил бўладиган кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига, ўзаро таъсир эластиклик, ёпишқоқлик ва ўзаро таъсир моделининг мустаҳкамланиш коэффициентларининг таъсирини аниқлаш;

грунт ҳаракати ҳаракатланувчи синус, ҳаракатланувчи синус ярим тўлқини импульси ва ҳаракатланувчи учбурчак шаклдаги импульс кўринишларида берилган ҳолларда ер ости қувурининг кучланганлик ва деформацияланганлик ҳолатига таъсирини аниқлаш;

«қувур–грунт» тизимининг ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсирини инобатга олганда ер ости қувурининг бўйлама тебраниши кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини сонли ҳисоблаш усулини ишлаб чиқиш;

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида сейсмик ҳудудларда жойлашган ер ости қувурлари (сув таъминоти, газ таъминоти, нефт таъминоти ва бошқалар) тизими олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** – «Қувур-грунт» тизимида ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсирида А.А.Ильющин моделидан фойдаланган ҳолда ер ости иншоотининг ҚДҲи, грунт хусусиятлари ва сейсмик юкланиш шаклининг ер ости қувурининг деформацияланган ҳолатига таъсирни тадқиқ қилишни ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот олиб бориш жараёнида деформацияланувчан қаттиқ жисмлар механикаси ва қурилиш механикаси усуллари, математик моделлаштириш, динамик параметрларини сонли ҳисоблаш учун чекли айирмалар усулидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

ер ости қувурлари сейсmodинамикасида, сонли тақрибий усулларнинг кенг қўлланилиши орқали, ҳисоблаш услублари такомиллаштирилган;

сейсмик таъсир аналитик функциялар, яъни ҳаракатланувчи синус тўлқини, синус ярим тўлқин импульси ва учбурчак шаклдаги импульс кўринишлардаги ҳолларда ер ости магистрал қувурларини ҳисоблаш усули ишлаб чиқилган;

чеккалари узелга маҳкамланган ер ости қувурининг бўйлама тебраниш масаласи Фурье усулидан фойдаланиб, аналитик ечим олинди. Натижалар сонли усулда олинган натижалар билан солиштирилди ва сонли усул ёрдамида олинган ечимларни етарли даражада аниқлиги исботланди;

«қувур–грунт» тизимида ер ости қувурларининг ёпишқоқ-эластик ва ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсирини инобатга олганда, ҚДҲни сонли ҳисоблаш услуби ишлаб чиқилган;

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

ер ости қувурининг кўндаланг кесимларида ҳосил бўладиган кўчиши ва деформациясига ўзаро таъсир эластиклик ва ёпишқоқлик коэффициентлари ва ўзаро таъсир моделининг мустаҳкамланиши коэффициенти инобатга олган ҳолда ишлаб чиқилган;

ер ости қувурида ҳосил бўладиган ҚДҲга импульс шаклининг таъсири аниқланди. Ундан ташқари ер ости қувурининг ҚДҲи, грунтда тўлқин тарқалиш тезлиги ва тебраниш даврига боғлиқлигини инобатга олган ҳолда ишлаб чиқилган;



ишлаб чиқилган («Ер ости магистрал қувурларининг турли хил кўринишдаги сейсмик таъсирларга ҳисоблаш дастури» № DGU 06814-2019 й.) дастури ошқор схема ёрдамида грунт деформацияси узилишга эга функция кўринишда бўлган ҳолларда, юқори аниқликдаги натижалар олиш, сейсмик ҳудудларда жойлашган ер ости қувурларининг сейсмодинамикаси масалаларини ечиш жараёнини автоматлаштириш имконини беради;

сейсмик ҳудудларда ер ости қувурларини ҳисоблаш услуги, лойиҳалаш жараёнида (ДУК«Сувсоз», Тошкент шаҳри, «Eshonguzar house» объекти, Тошкент вилояти) фойдаланилиб, иш сифатини ортишига, ҳисоблаш вақтини 1.25 марта тежалишига, ҳудуднинг сейсмик интенсивлиги ва тупроқ шароитидан келиб чиқиб ер ости қувурида ҳосил бўладиган кучланишни 10–30 % га камайтиришга эришилди, бу эса ўз навбатида қувур мустаҳкамлигини оширади.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги, замонавий услуб ва воситалардан фойдаланган ҳолда ўтказилган назарий тадқиқотлар асосида олинган натижалар, реал маълумотлар билан таққосланди, шунингдек олинган натижалар маҳаллий ва чет эл олимлари томонидан олинган натижалар билан солиштирилиб, ишончлилиги исботланди, ҳамда олинган натижалар ва сонли усулларни тўғрилиги таъминланиб, амалиётга жорий қилинганлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти, ер ости иншоотлари сейсмодинамикаси назариясини келгусидаги ривожланишида, ер ости қувурининг грунт билан чизиксиз ўзаро таъсирида кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига оид янги материаллар асосида тўлдириш билан изоҳланади. Ер ости қувурининг грунт билан ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсири тадқиқ қилинган сонли ҳисоблаш усули ва математик модели ер ости қувурлари сейсмодинамикаси жараёнларини тасвирлашида ўз исботини топади. Диссертация ишининг натижалари қувур КДҲга контактда ўзаро таъсирнинг чизиксиз хусусиятини таъсири – пластиклик назариясига ўзининг янги ҳиссасини қўшиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти қуйидагиларни ўз ичига олади, ер ости қувурлари сейсмодинамикасини ечишга мўлжалланган услуб асосида тузилган, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминотлар мажмуи, ер ости қувурлари сейсмодинамикасини ҳисоблашни ягона концепциясини ўзида акс эттиради. Бу сейсмик ҳудудларда ер ости (сув таъминоти, газ таъминоти, нефт таъминоти ва бошқалар) қувурларини лойиҳалаш ва қуриш жараёнларини тезлашишига, бажарилган иш сифатини ортишига, ҳаётни таъминловчи тизимларни мукамал, турғун ишлашига эришилади, ҳамда сейсмик хавф-хатарни сезиларли даражада пасайтириши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Ер ости қувурлари сейсмодинамикаси жараёнларини тадқиқоти бўйича олинган илмий натижалар асосида:

«кувур-грунт» тизимининг ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсирида ер ости қувурини ҳисоблаш услуги, изланиш натижалари «HI-TECH DESIGN» МЧЖда ер ости қувурларини лойиҳалаш ва эксплуатацияси жараёнига жорий этилган («HI-TECH DESIGN» МЧЖнинг 2019 йил 1 ноябрдаги далолатномаси). Натижада лойиҳалаш жараёнида ҳисоблаш вақтини 1.25 марта тежалишига, қувурнинг турғунлиги 1.15 марта чидамлилиқ захираси билан ҳисобланиш имкони яратилган;

«кувур-грунт» тизимининг ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсирида ва сейсмик таъсир синус ярим тўлқини ва учбурчак шаклдаги импульслар кўринишида бўлган ҳолда «кувур-грунт» тизимининг ёпишқоқ-эластик ўзаро таъсирида ер ости қувурининг ҳисоблаш услуги, «Сувсоз» ДУКда ер ости қувурларини лойиҳалаш жараёнига жорий этилган («Сувсоз» ДУКнинг 2019 йил 22 октябрдаги далолатномаси). Илмий изланиш натижасини тадбиқ этилиши, қурилиш майдончасининг сейсмик интенсивлигини ҳисобга олган ҳолда, қувурни турғун ишлаши ва хизмат вақтини 1.6 марта узайтириш, қувурда ҳосил бўладиган кучланишни 10-30% га камайитириш имкони яратилган;

тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этилиши ҳақида Қурилиш вазирлигидан (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг 2019 йил 30 декабрдаги №10391/09-07 –сон маълумотномаси) ижобий хулоса олинди.

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

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 16 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 8 та мақола, жумладан, 5 таси республика ва 3 таси хорижий журналларда нашр қилинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби, кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 120 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида бажарилган тадқиқотнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари, объекти ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Ер ости қувурларининг сейсмикбардошлилиги соҳасида изланишларнинг тизимли таҳлили**» деб номланган биринчи

бобида ер ости қувурлари сейсmodинамикасининг назарий ва экспериментал ривожитадқиқи келтирилган. Юртимиз олимлари томонидан ер ости ва усти иншоотлари сейсмик бардошлилиги соҳасида бажарилган ишларнинг аналитик умумлашмаси келтирилган. Дунёда содир бўлган кучли зилзилалар ва уларнинг оқибатида ер ости қувурлари шикастланиши ҳақидаги маълумотлар келтирилган. Ҳар бир бўлиб ўтган зилзила асорати ер ости қувури шикастланиш расмлари ва қувурларга етган умумий талофат ҳақида маълумотлар келтирилган.

Зилзила натижасида қувурларнинг шикастланганлик даражаси бир қатор факторларга боғлиқ: сейсмик таъсирнинг интенсивлигига, геологик ва гидрогеологик шароитларга, эксплуатацион-технологик зўриқиш ва таъсирларга, қувур конструкциясига, қувур материали характеристикаларига, эксплуатация даврига.

Ер ости қувурини ўраб турган грунт, нафақат сейсмик таъсир манбаи бўлибгина қолмай, балки қувур билан тебраниш жараёнида қатнашади. Қувурни ўраб турган грунт мухитининг биржинслилиги ва зичлигига, музлашнинг миқдори ва грунт намлигига қараб зилзила интенсивлиги номоён бўлиши ва иншоотнинг грунт билан таъсирлашиш механизми турлича бўлади.

Шу сабабли сейсмик таъсир остида ер ости ва усти қувурларининг ҳаракати тўғрисидаги маълумотларни таҳлил қилишда эмпирик ва экспериментал тадқиқотлар катта аҳамиятга эга.

Сўнги йилларда ер ости қувурларининг зилзилалардаги хавфсизлигига катта эътибор қаратилмоқда. Ер ости қувурларининг муҳим характеристикалари шундаки, улар катта майдонни қамраб олади ва турли геотектоник хавф хатарларга дучор бўлади. Ер ости қувурларининг ер усти иншоотлардан яна бир ўзига хос фарқи шундан иборатки, қувур уни ўраб турган грунтга нисбатан ҳаракатда бўлиши, одатда кичик, қувур ва ундан оқаётган масса оғирлигига боғланган инерция кучига нисбатан аҳамиятсиз. Ер ости қувури ёки грунтнинг доимий ҳаракатидан ёки тарқалувчи сейсмик тўлқин натижасида шикастланиши мумкин. Дунёда содир бўлган кучли зилзилаларда ер ости қувурларига етган талофат ҳақида маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Чизикли магистрал ер ости қувурининг грунт билан ёпишқоқ-эластик ўзаро таъсиридаги тебраниши**» деб номланган иккинчи бобида ер ости магистрал қувурининг «қувур–грунт» тизимидаги ёпишқоқ-эластик ўзаро таъсиридаги тебраниши кўрилган. Ер ости магистрал қувурининг грунт билан чизикли ёпишқоқ–эластик ўзаро таъсиридаги тебранишини ҳисоблаш методикаси тасвирланган ва натижалар олинган. Олинган натижалар тизимли таҳлил қилинган.

L узунликдаги қувурни қараймиз, ҳаракат тенгламаси қуйидагича бўлади:

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E \cdot F \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \pi \cdot D \cdot \tau = 0, \quad (1)$$

бу ерда  $u$  – кувурнинг ўқ бўйлаб кўчиши;  $m$  – узунлик бирлигига мос келувчи масса;  $E$  – кувур материалнинг Юнг модули;  $F$  – кувур қўндаланг кесими юзаси, бунда  $s$  ва  $D$  – мос равишда, кувурнинг қалинлиги ва ташқи диаметри;  $\tau$  – уринма кучланиш.

Ўзаро таъсирнинг ёпишқоқ-эластик хусусиятини ифодалашда Келвин-Фойгт моделини олсак, унда бўйлама таъсирда кувур ва грунт кўчиш тезликларининг айирмаси тўлқин тарқалиши ҳисобига энергия ютилишига жавоб беради. Шу сабабли кувур ва грунт орасидаги уринма кучланиш қуйидагича ёзилади.

$$\tau = k_x \cdot (u - u_g) + \mu / H \cdot (\dot{u} - \dot{u}_g), \quad (2)$$

бу ерда  $u_g$  – грунтнинг бўйлама кўчиши;  $k_x$  – «кувур-грунт» тизимида эластик ўзаро таъсир коэффиценти;  $\mu$  – «кувур-грунт» тизимида ёпишқоқ ўзаро таъсир коэффиценти;  $H$  – ер ости кувурининг қўмилиш сатҳи.

Агар (2) уринма кучланишни эътиборга олсак, унда (1) қуйидаги кўринишга келади.

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E \cdot F \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \pi \cdot D \cdot \frac{\mu}{H} \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right) + \pi \cdot D \cdot k_x \cdot (u - u_g) = 0 \quad (3)$$

Бошланғич шартлар:

$$u(x, 0) = 0 \quad \text{ва} \quad \dot{u}(x, 0) = 0. \quad (4)$$

Чекли узунликдаги кувурни ҳисоблашда кувур чеккаларидаги чегаравий шартлар зарур бўлади. Уч хил кўринишдаги чегаравий шартларни кўриб чиқамиз.

Биринчи кўринишдаги чегаравий шартлар ер ости кувури чегаралари грунт билан бир хил кўчадиган ҳол учун қуйидагича ёзилади:

$$\text{а) } u(0, t) = u_g(0, t), \quad \text{б) } u(l, t) = u_g(l, t). \quad (5)$$

Иккинчи кўринишдаги чегаравий шартлар ер ости кувурининг четларида деформациялар нолга тенг бўлган ҳол учун:

$$\text{а) } \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \text{б) } \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=l} = 0. \quad (6)$$

Чегаравий шартларнинг учинчи кўриниши четлари эластик маҳкамланган кувур чегараларидаги бўйлама кучларга нисбатан ёзилади:

$$\text{а) } E \cdot F \cdot \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = k_{N1} \cdot (u - u_g) \Big|_{x=0}, \quad \text{б) } E \cdot F \cdot \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=l} = -k_{N2} \cdot (u - u_g) \Big|_{x=l}. \quad (7)$$

Сейсмик тўлқинларнинг тарқалишини олдиндан айтишнинг имкони йўқлигини инобатга олсак, кўпчилик олимлар грунт ҳаракатини битта синусоидал тўлқин кўринишида ифодалашади. Кувурга параллел йўналишда грунт кўчишини, қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин

$$u_g = \begin{cases} A \cdot \sin \omega (t - x / C_p), & \text{агар } t > x / C_p, \\ 0, & \text{акс холда,} \end{cases} \quad (8)$$

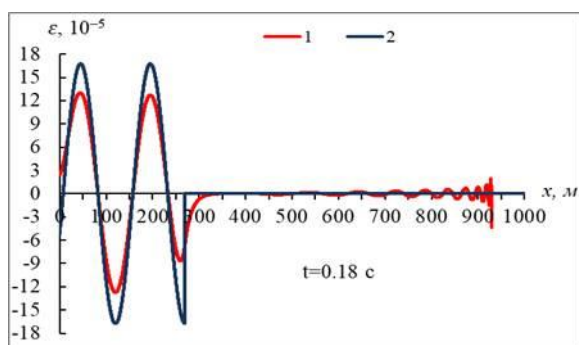
бу ерда  $A$  – грунтнинг максимал кўчиши;  $\omega$  – сейсмик тўлқиннинг тебраниш бурчак тезлиги,  $\omega = 2\pi / T$  – формула ёрдамида аниқланади;  $C_p$  – тўлқин

тарқалишининг “зоҳирий тезлиги” (бундан кейин биз буни грунтдаги тўлқин тарқалиш тезлиги номи билан ишлатамиз). Грунтдаги тўлқин тарқалишининг “зоҳирий тезлиги” тўлқиннинг қувур ўқиға тушиш бурчағи ёки қувур боғламларининг деформацияланувчанлиғи туфайли катта бўлиши мумкин.

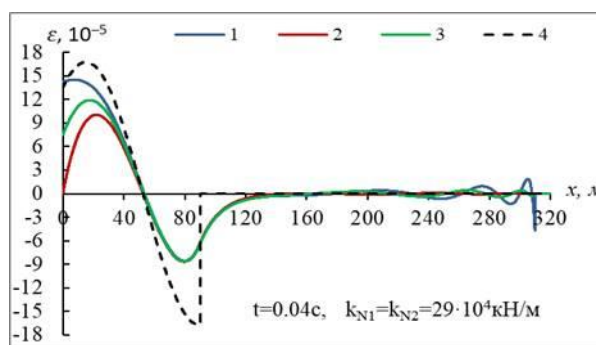
Пўлат қувур характеристикалари:  $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ,  $D = 0.61 \text{ м}$ ,  $s = 0.01 \text{ м}$ ,  $m = 141.1 \text{ кг/м}$ .

Грунт характеристикалари: гармоник тўлқин даври  $T = 0.1 \text{ с}$ ,  $k_x = 10^4 \text{ кН/м}^3$ ,  $\mu = 0 \text{ кН} \cdot \text{с/м}^2$ ,  $C_p = 1500 \text{ м/с}$ ,  $A = 0.004 \text{ м}$ ,  $H = 1 \text{ м}$ .

Масала чекли айирмалар усулининг ошкор схемаси ёрдамида, координата ва вақт қадами қуйидаги муносабатда олинган  $\Delta x / \Delta t = a_0$ , бу ерда  $a_0 = \sqrt{E \cdot F / m}$  – қувурда тўлқин тарқалиш тезлиғи. Ҳисоблашлар  $\Delta x = 0.1$  метрда ўтказилди. Ишлаб чиқилган алгоритм асосида масаланинг компьютерда ҳисоби бажарилган, натижалари 1,2-расмларда келтирилган.



**1-расм. Деформациянинг координата бўйича ўзгариши: 1–қувурдаги тўлқин; 2–грунтдаги тўлқин**



**2-расм. Деформациянинг координата бўйича ўзгариши: 1–маҳкамланган чегаралар; 2–эркин чегаралар; 3–эластик маҳкамланган чегаралар; 4–грунтдаги тўлқин**

Пўлат қувурда тўлқин тарқалиш тезлиғи тахминан 5120 м/с, грунтда эса ушбу тезлик грунт турига боғлиқ. Айтайлик грунтда тўлқин 1500 м/с тезлик билан тарқалсин. 1-расмда узунлиғи 1000 метр бўлган икки томони грунтга маҳкамланган ер ости магистрал қувурининг деформациясини координата бўйича ўзгариши кўрсатилган. Бу ерда чап чегарасидан тахминан 930 метр масофада деформация узилиши кўринган, тўлқин fronti ортида эса қувурдаги тўлқиннинг грунт билан ўзаро таъсирлашиши натижасида деформация «тебраниши» кўринади. Тўлқин frontiдаги деформация микдорини сўниши, масаланинг дискретлаштириш билан боғлиқ. Чунки қувурдаги тўлқин тарқалиш тезлиғи грунтдаги тўлқин тарқалиш тезлиғига нисбатан кичик, унда грунтдаги тўлқин келгунга қадар грунтда қаралаётган нуктада қувур кўндаланг кесимини тўхтатишга интилади. Грунт бевосита қувурдаги тўлқин fronti ортида шундай қаршилиқ кўрсатадики, деформация маълум бир масофагача ишорасини ўзгартириб ва секин аста тўлқин frontидан узоклашгани сари деформация тебраниши сўниб боради.

Бу билан бирга грунтдаги тўлқин қувур ён сирти бўйлаб таъсир қилади ва қувурда тўлқин пайдо қилади.

Қувур четида қувур ва грунт орасидаги эластиклик коэффициенти ошиши билан қувур деформация фронти амплитудаси ошади, бунда чеккалари қаттиқ маҳкамланган ҳолдаги қийматидан ошиб кетмайди (2-расм)

Шундай қилиб, қувурда тўлқин фронти тарқалади ва у миқдор жиҳатдан, грунт максимал деформацияси миқдорининг ярмига тенг. Грунт, қувур ён сирти орқали таъсирлашиши оқибатида қувурни ҳаракатга келтиради ва қувурда ҳосил бўладиган деформация грунтда ҳосил бўладиган деформацияни такрорлайди, аммо қувур деформациясининг максимал қиймати, грунтда ҳосил бўладиган деформациянинг максимал қийматидан кичик бўлади.

Диссертациянинг «**Грунт ҳаракатининг турли аналитик шаклларида ер ости магистрал қувурининг кучланганлик деформацияланганлик ҳолати**» деб номланган учинчи бобида, грунт билан ёпишқоқ-эластик ўзаро таъсирдаги чекли узунликдаги қувурга, бўйлама тўлқин таъсири масаласи қаралган. Қувур четлари уни ўраб турган муҳит билан чизикли қонун билан ўзаро тасирлашадиган оғир узелга маҳкамланган. Ер ости магистрал қувурининг КДХга, грунт ҳаракати ҳаракатланувчи синус кўринишида берилганда, ўзаро таъсир эластик ва ёпишқоқ коэффициентларининг таъсири келтирилган. Солиштиришлар уч турдаги чегаравий шартларда: грунтга эркин, қаттиқ ва ёпишқоқ маҳкамланган ҳолларда олиб борилган. Грунт таъсири ҳаракатланувчи синус ярим тўлқини ва учбурчак шаклдаги импульслар кўринишида бўлганда ер ости магистрал қувурларнинг КДХни ҳисоблаш амалга оширилган. Грунт тебраниш даври, тўлқин тарқалиш тезлиги ва чегарадаги ёпишқоқлик коэффициентларга боғлиқ равишда ер ости қувурларининг КДХ таҳлил қилинган. Ундан ташқари ер ости қувури ҳаракатига импульс шаклининг таъсири таҳлил қилинган. Грунт ҳаракати синус ярим тўлқини ва учбурчак шаклдаги импульслардаги натижалар солиштирилган. Ундан ташқари қувур ва грунтдаги тўлқинларни қўшилиши натижасида максимал деформация ошиши кўрсатилган.

Қувурнинг ташқи сирти грунт билан қувур ўқи бўйлаб ёпишқоқ-эластик қонун бўйича таъсирлашади, қувур четлари бўлса оғир узеллар билан эластик элемент орқали бириккан.

Ушбу фаразларни инобатга олиб қувур бўйлама тебраниш тенгламаси ва чегаравий шартлар қуйидагича ёзилади:

$$\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_0[u - u_g(x, t)] + \gamma_0 \left[ \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right] = 0, \quad 0 < x < l, \quad (9)$$

$$m_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = EF \frac{\partial u}{\partial x} - k_1 [u - u_g(0, t)] \quad x = 0 \text{ бўлганда}, \quad (10)$$

$$m_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -EF \frac{\partial u}{\partial x} - k_2 [u - u_g(l, t)] \quad x = l \text{ бўлганда}. \quad (11)$$

$$\text{Бошланғич шартлар: } u = 0, \dot{u} = 0 \quad (12)$$

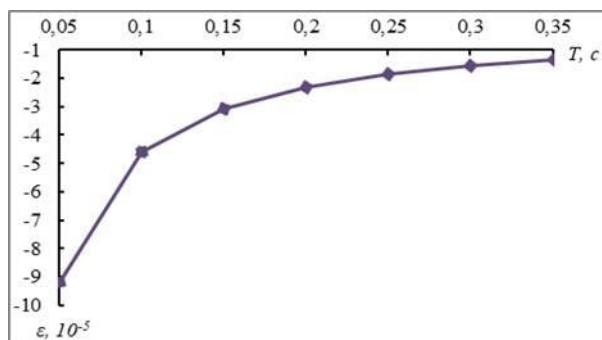
бунда  $E, \rho$  – қувур материал Юнг модули ва зичлиги;  $F, l$  – қувур кўндаланг кесим юзаси ва узунлиги;  $k_0$  – қувур ва уни ўраб турган мухитнинг бўйлама ўзаро таъсир коэффициентлари;  $m_1$  ва  $m_2$  узеллар массалари,  $k_1$  ва  $k_2$  чегаралардаги бикирлик коэффициентлари.

Грунт ҳаракати (8) кўринишида бўлганда, (9) тенглама учун (10)–(12) бошланғич чегаравий масалани Фурье усули ёрдамида ҳисобланган ва натижалар олинган.

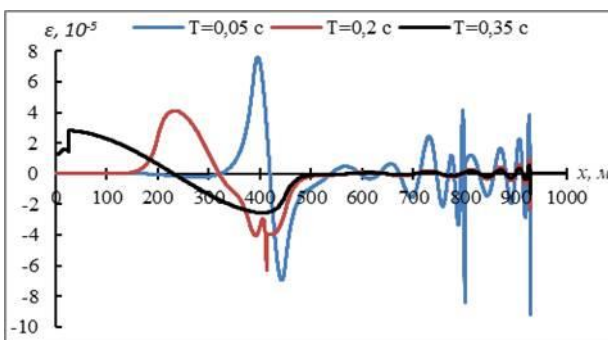
Грунт ҳаракати синус ярим тўлқини импульси кўринишида бўлганда

$$u_g = \begin{cases} A \cdot \sin \omega (t - x / C_p), & 0 \leq t - x / C_p \leq T / 2, \\ 0, & T / 2 < t - x / C_p \text{ ва } t - x / C_p < 0. \end{cases} \quad (13)$$

Ишлаб чиқилган алгоритм асосида масала компьютерда ҳисоблаш ишлари бажарилган, грунт (13) синус ярим тўлқини кўринишидаги ҳаракатидаги натижалар келтирилган.



**3-расм. Деформацияни грунт тебраниш даврига боғлиқ ҳолда ўзгариши. ( $C_p=2500$  м/с)**



**4-расм. Деформацияни координата бўйича ўзгариши. ( $C_p=2500$  м/с,  $k_x=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>)**

Олдин айтиб ўтилганидек, грунт тебраниш даври қувур деформациясининг максимал қийматига таъсир қилади, шунингдек тўлқин фронтларидаги деформация қийматига ҳам таъсир кўрсатади. 3 ва 4 расмларда тўлқиннинг олдинги фронтидаги деформация миқдорини грунт тебраниш даврига боғлиқлик графиги кўрсатилган, импульс тебраниш даври ошиши билан фронтда деформация камаяди.

Грунт деформацияси ва тебраниш даври тескари пропорционал муносабатда бўлади. Қувур ва грунтдаги деформация миқдори  $T > 0.3$  с бўлганда деярли бир хил бўлади. Бошқа ҳолда грунт деформацияси қувур деформациясидан катта бўлади.

Грунт ҳаракати учбурчак шаклдаги импульс кўринишида берилганда.

$$u_g = \begin{cases} 4A \cdot (t - x / C_p) / T, & 0 \leq t - x / C_p \leq T / 4, \\ 2A \cdot [1 - 2(t - x / C_p) / T], & T / 4 \leq t - x / C_p \leq T / 2, \\ 0, & T / 2 < t - x / C_p \text{ ва } t - x / C_p < 0, \end{cases} \quad (14)$$

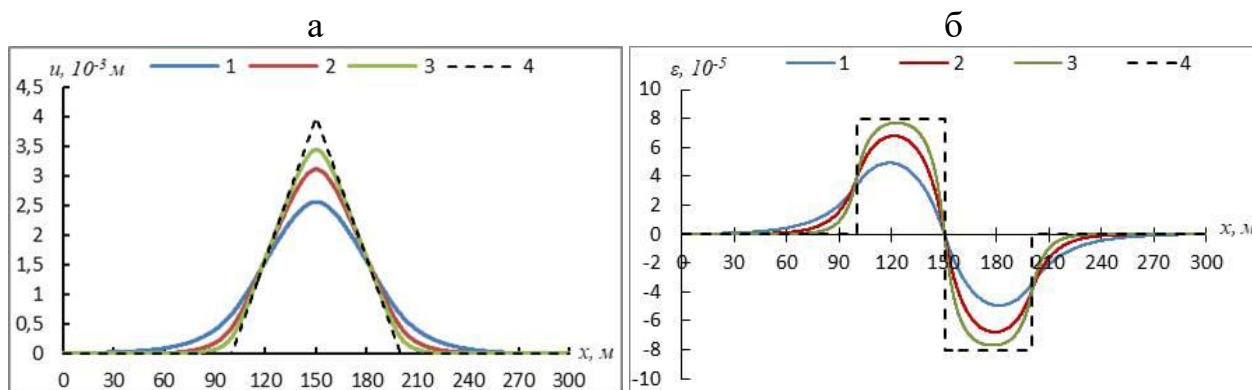
Грунт ҳаракатини деформацияларда ёзиш мумкин, унда (14) тенглама куйидаги кўринишни олади.

$$\varepsilon_g = \begin{cases} -4A / (T \cdot C_p), & 0 \leq t - x / C_p \leq T / 4, \\ 4A / (T \cdot C_p), & T / 4 \leq t - x / C_p \leq T / 2, \\ 0, & T / 2 < t - x / C_p \text{ ва } t - x / C_p < 0. \end{cases} \quad (15)$$

Грунтдаги тўлқин (14) учбурчак шаклдаги импульс кўринишида ифодаланган, унда тўлқиндаги грунт зарраларининг деформацияси (15) погонасимон функция кўринишида ўзгаради. Шу сабабдан, тўлқин фронтида кўчиш нолга тенг, заррачалар деформацияси эса сакрашга эга бўлади

Грунт ҳаракати (15) кўринишида бўлганда учта нуқтада биринчи тур узилишга эга, ушбу деформация узилишларни қувур чегараларидан ўтиш жараёнида узилиш фронти тарқалади. Қувур чегаралари қаттиқ маҳкамланганда фронтда деформация миқдори тақрибан грунт деформациясининг ярмига тенг. Импульс ер ости қувурини чап чегарасини тўлиқ ўтгандан кейин учта деформация тўлқин фронти тарқалади.

Импульс таъсир вақтининг кичик қийматларида ўзаро таъсир эластик коэффиценти қувурдаги кўчишининг (5,а-расмга қаранг) ва деформациянинг (5,б-расмга қаранг) максимал қийматига таъсир қилади.



**5-расм. Кўчиш (а) ва деформацияни (б) координата бўйича ўзгариши: 1– $k_x=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>; 2– $k_x=1.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>; 3– $k_x=4 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>; 4–грунтдаги тўлқин.**

Импульслар таҳлили шуни кўрсатдики импульс шакли, таъсир вақти ва тарқалиш тезлиги ер ости қувурининг ҚДҲига салмоқли таъсир кўрсатади.

Компьютер учун ишлаб чиқилган амалий дастур қувур параметрлари, грунт шароитлари ва чегараларида турли маҳкамланишларга боғлиқ ҳолда, турли хил сейсмик таъсирларда бир қатор сонли натижалар олиш имконини беради. Шу билан бирга ер ости қувурини ўқи бўйлаб сейсмик таъсир йўналганда қувур кучланганлик деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилишни автоматлаштириш имконини беради.

Диссертациянинг «Грунт билан ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсирида ер ости қувурларининг сейсmodинамикаси» деб номланган тўртинчи бобида, «қувур-грунт» тизимининг ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсирида ер ости қувурларининг бўйлама тебраниш масаласи қаралган. Ер ости қувури грунт билан ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсирида



ҳисоблаш методикаси тасвирланган. Ер ости қувури уни ўраб турган муҳит билан чизиксиз муносабатда бўлганда кучланганлик деформацияланганлик ҳолатини аниқлаш масаласини ечиш ва компьютерга жорий этиш алгоритми ишлаб чиқилган. Масала ечимининг турли хил чегаравий шартларда таҳлили ўтказилган. Келгусида сейсмик ҳудудларда ер ости иншоотларини лойиҳалаш ва қуриш жараёнларини тезлаштириш имконини берадиган, турли хил қувур тизимларининг сейсmodинамикасини ўрганиш бўйича умумий универсал комплекс дастурларни яратиш режалаштирилмоқда. Олинган натижаларнинг ишончлилигини текшириш мақсадида бу соҳада олинган олдинги натижалар билан солиштирилган. Кўлланилган ҳисоблаш схемалари ер ости қувурларининг сейсmodинамикасидаги бир қатор янги муаммоларни ҳал қилишга имкон беради.

Грунт билан ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсиридаги ер ости қувурининг бўйлама тебраниш тенгламаси қуйидагича ёзилади

$$m \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} - EF \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \pi D \tau_n = EF \frac{\partial^2 u_g}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} \quad (16)$$

Ер ости қувурининг таъсирлашиш сиртидаги уринма кучланиши,  $n = 0, 1, 2, 3, 4$  бўлганда қуйидагига тенг

$$\tau_0 = (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \bar{u},$$

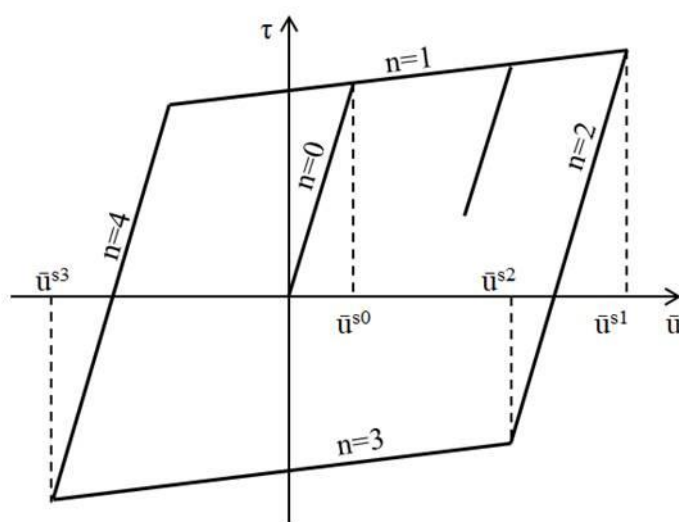
$$\tau_1 = (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \tilde{u}^{s0} + k'_x (\bar{u} - \tilde{u}^{s0}),$$

$$\tau_2 = (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \tilde{u}^{s0} + k'_x (\tilde{u}^{s1} - \tilde{u}^{s0}) + k_x (\bar{u} - \tilde{u}^{s1}),$$

$$\tau_3 = (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \tilde{u}^{s0} + k'_x (\tilde{u}^{s1} - \tilde{u}^{s0}) + k_x (\tilde{u}^{s2} - \tilde{u}^{s1}) + k'_x (\bar{u} - \tilde{u}^{s2}),$$

$$\tau_4 = (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \tilde{u}^{s0} + k'_x (\tilde{u}^{s1} - \tilde{u}^{s0}) + k_x (\tilde{u}^{s2} - \tilde{u}^{s1}) + k'_x (\tilde{u}^{s3} - \tilde{u}^{s2}) + k_x (\bar{u} - \tilde{u}^{s3}),$$

бунда  $\bar{u}$  – нисбий кўчиш,  $\tilde{u}^{si}$  – ҳаракатнинг  $i$ -чи босқичида янги ўзаро таъсир эластиклик чегараси.



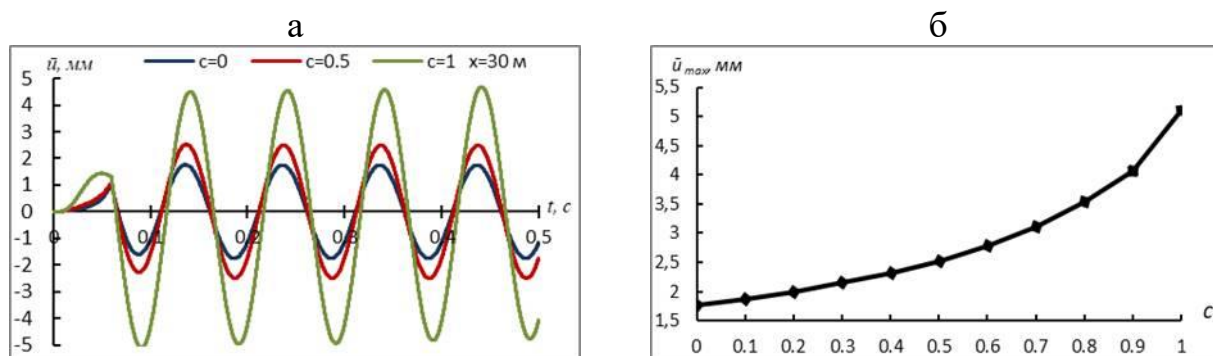
6-расм. Ўзаро таъсирнинг бичизиқли қонунига мос келувчи  $\tau \sim \tilde{u}$  боғлиқлик диаграммаси

(16) тенгламани ечишда иккинчи тартибли аниқликдаги чекли айирмалар усулининг ошқормас схемасидан фойдаланамиз.

Механик ва геометрик параметрлар қуйидаги қийматларда қаралади:  $E=2.1 \cdot 10^{11}$  Па;  $\rho=7.8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $D_H=0.61$  м;  $D_B=0.6$  м;  $F=\pi(D_H^2 - D_B^2)/4$  м<sup>2</sup>;  $l=100$  м;  $\omega=2\pi/T$ ;  $A_p=4$  мм;  $T=0.2$  с;  $C_p=800$  м/с;  $k_x=2 \cdot 10^7$  Н/м<sup>3</sup>;  $u_s=0.1$  мм.

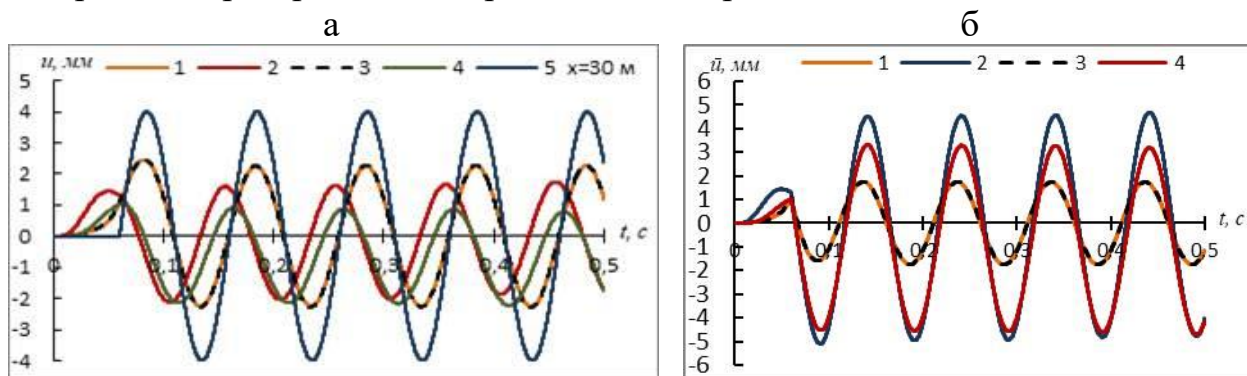
Ишлаб чиқилган алгоритм асосида масалани компьютер дастури яратилди, унинг натижалари расмлар кўринишда қуйида келтирилган.

7-расмда ўзаро таъсир  $c=(k_x - k'_x)/k_x$  ўзаро таъсир моделининг мустаҳкамланиш коэффициентининг 0 дан 1 гача ўзгаришида нисбий кўчишнинг максимал қиймати ошиши кўрсатилган.



**7-расм. Нисбий кўчишни вақт бўйича ўзгариши (а) ва нисбий кўчишни максимал қийматини  $c$  коэффициентга боғлиқ ҳолда ўзгариши (б)**

«Қувур–грунт» тизимининг ёпишқоқ-эластик ўзаро таъсирида ер ости қузури кўчишига чегаравий шартлар кам таъсир кўрсатади. 8-расмда кўрсатилганидек,  $c=1$  ўзаро таъсир моделининг мустаҳкамланиш коэффициентида, абсолют ва нисбий кўчишларнинг максимал қийматларига чегаравий шартларнинг таъсири салмоқлидир.



**8-расм. Абсолют (а) ва нисбий (б) кўчишнинг вақт бўйича ўзгариши: 1 –  $c=0$ , чегараси маҳкамланган; 2 –  $c=1$ , чегараси маҳкамланган; 3 –  $c=0$ , чегараси эркин; 4 –  $c=1$ , чегараси эркин; 5–грунтда.**

Солиштиришлар шуни кўрсатадики, қувурнинг грунт билан ўзаро таъсирининг чизиқсизлиги, қувур ва грунт орасидаги нисбий кўчишни ортишига ва қувурда ҳосил бўладиган нормал кучланиш қийматини камайишига олиб келади. Ўзаро таъсирнинг чизиқсизлигини инобатга олган

ҳолда грунтга қаттиқ маҳкамланган чегаравий шартлардаги максимал нисбий кўчиш, эркин чегаравий шартга нисбатан катта бўлади.

## ХУЛОСА

«Ер ости қувурининг грунт билан ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсири сейсмодинамикаси (чизикли ва чизиксиз масалалар)» мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижалари асосида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Табиий грунтларда ётқизилган ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати тадқиқотларини ўтказиш имкониятини берувчи сонли ҳисоблаш услублари ва дастурий мажмуалари ишлаб чиқилди. Ишлаб чиқилган ҳисоблаш усуллари турли сейсмик таъсирларда, турли грунт шароитларда ва турли чегаравий шартларни инобатга олган ҳолда, ер ости қувурларининг сейсмик мустаҳкамлигини ҳисоблашга имкон беради.

2. Ҳар бир муайян ҳол сонли қийматларга келтирилди, ер ости қувурида сейсмик зўриқиш таъсирида максимал нормал кучланиши вужудга келадиган ҳавфли кесимлари аниқланди. Танланган сонли усулларда ўтказилган таҳлилларни ишончлилигини исботлаш мақсадида, олинган натижалар аввалги ечилган масалалардан олинган натижалар билан солиштирилди ва бу сонли ечимни турғунлигини кўрсатишни имконини беради.

3. Ер ости қувурлари зилзилабардошлиги соҳасида чет эл ва маҳаллий олимларнинг илмий тажрибаларини инобатга олган ҳолда, ер ости қувурининг бўйлама тебраниш дифференциал тенгламасини ечишда, грунт деформацияси узилишга эга функция кўринишида бўлганда, юқори аниқликдаги натижа олиш имконини берадиган, Курант шартини қаноатлантирувчи чекли айирмалар усулининг ошкор схемасидан фойдаланиб ечилди. Ушбу усул ёрдамида олинган натижалар аниқ ечим билан етарлича яхши мос тушадиган ечим олишга имкон беради.

4. Грунт ҳаракат функцияси, ҳаракатланувчи синус тўлқини, синус ярим тўлқин импульси ва учбурчак шаклдаги импульс кўринишидаги аналитик функциялар кўринишида олинганда ҳисоблаш имконини берадиган усул ишлаб чиқилди. Ишлаб чиқилган усул тўлқин тарқалишини ҳаракатланувчи синус кўринишида олган ҳолда, чегараларда қаттиқ маҳкамланганлиги ҳисобига ер ости қувурида грунт деформациясининг максимал қийматининг ярмига тенг бўлган, деформация тўлқини фронти тарқалишини аниқлаш имконини беради.

5. «Қувур-грунт» тизимининг ёпишқоқ-эластик ўзаро таъсирида ер ости қувурида, энергия тарқалиш ҳисобига, қувурда тўлқин фронти сўнади ва грунт билан стационар ҳаракатга чиқади. Грунтнинг қаттиқ турларида қувур деформацияси ва грунт деформацияси устма-уст тушишини имконини беради.

6. Грунт билан ёпишқоқ-эластик-пластик ўзаро таъсиридаги ер ости қувурининг бўйлама тебраниши учун ҳисоблаш усули (схемаси) ишлаб

чиқилди. Ишлаб чиқилган усул ер ости қувурининг грунт билан ёпишқоқ-эласти-пластик ўзаро таъсирида ишлаш цикли, бир босқичдан бошқа босқичга ўтишда мураккаблашади, шу сабабли мос схемани танлаш тўғри ечим олиш имконини беради. Чекли айирмалар усулининг схемаларини таҳлил қилиш натижасида, ошқормас схема танланди, ушбу схемадан фойдаланиш чизиқсиз масалаларни ечишда турғун ечим олиш имконини беради

7. Ер ости қувурининг бўш ва дисперс грунт шароитида траншеяда ётқизиш натижасида, қувурда ҳосил бўладиган деформация камайишга ва мос равишда кучланишни камайишига олиб келади. Ўзаро таъсирнинг эластиклик чегараси кичик бўлган грунтлардан фойдаланиш ер ости қувурида ҳосил бўладиган кучланишни камайтиради, аммо нисбий кўчиш ошади бу эса ўз навбатида ер ости қувурлари сейсמודинамик назариясини такомиллаштиради.

8. Натижаларнинг амалий аҳамиятининг муҳимлиги бевосита масаланинг қўйилишидан келиб чиқади. Шунинг учун илмий-тадқиқот ишларида нафақат алгоритмлар ва компьютерда ҳисоблаш дастурлари яқунланган, балки якуний амалий натижаларгача олиб борилган. Улар ҚМҚ 2.01.03-96 «Зилзилавий ҳудудларда қурилиш» меъёрий ҳужжатининг IV «Ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқлари» бўлимига қўшимчалар қўшишда муҳим аҳамият касб этади ва лойиҳалаш жараёнида зилзилабардош ер ости коммуникацияси қуриш имконини беради.

9. Олинган натижалар ер ости қувурларини лойиҳалашда («Eshonguzar house» объекти, Ташкент вилояти; ДУК «Сувсоз», Ташкент шаҳри) фойдаланилиб, иш сифати ва меҳнат унумдорлигини 10% гача ортишига, ҳисоблаш вақтини 1.25 марта тежалишига ва ер ости қувурида ҳосил бўладиган кучланишни 10-30% гача камайиришни имконини беради.

Талабгор ЎзР ФА академиги, т.ф.д. проф. Т.Р.Рашидовга, ф.-м.ф.д., проф. К.С.Султановга, ф.-м.ф.д., проф. Б.Мардоновга ва т.ф.д. проф. Г.Х. Хожиметовга диссертация иши қўлёзмасини яхшилашдаги қимматли маслаҳатлари учун ўзининг самимий миннатдорчилигини билдиради.

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

---

**ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ  
ИМ. М.Т.УРАЗБАЕВА АН РУз**

**ХУСАИНОВ РАХМАТЖОН БАХРАМБАЕВИЧ**

**СЕЙСМОДИНАМИКА ВЯЗКО-УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА С ГРУНТОМ  
(ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ)**

01.02.04-Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2021**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2018.2.PhD/FM233.**

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

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.instmech.uz](http://www.instmech.uz)) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).)

**Научный руководитель:**

**Рашидов Турсунбой Рашидович**

доктор технических наук, профессор, академик

**Официальные оппоненты:**

**Сафаров Исмоил Иброхимович**

доктор физико-математических наук, профессор

**Абдикаримов Рустамхан Алимханович**

доктор физико-математических наук

**Ведущая организация:**

**Самаркандский Государственный университет**

Защита диссертации состоится «16» июля 2021 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.T/FM.61 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений (Адрес: 100125, Ташкент, улица Дурмон Юли, 33, 1-конференц зал. Тел.: (99871) 262-71-52; Факс: +(99871) 262-71-32, e-mail: [instmech@academy.uz](mailto:instmech@academy.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Институте механики и сейсмостойкости сооружений (зарегистрирована за № 9). (Адрес: 100125, Ташкент, улица Дурмон Юли, 33. Тел.: +(99871) 262-71-52).

Автореферат диссертации разослан «28» июня 2021 года.  
(реестр Протокола рассылки № 5 от «16» июня 2021 года).



**М. Мирсаидов**

Председатель Научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
д.т.н., профессор, академик

**М.К.Усаров**

Ученый секретарь Научного совета по  
присуждению ученых степеней, д.ф.-м..н

**Р.А.Абиров**

Председатель Научного семинара при Научном совете  
по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мировой практике увеличение объемов и географии добычи и транспортировки нефти и газа, и ускоренный рост городов и поселков городского типа, где используются преимущественно подземные коммуникационные системы жизнеобеспечения, приводят к расширенному строительству сетей подземных трубопроводных систем, в том числе, к строительству подземных трубопроводов в районах с высокой сейсмичностью, что остается одной из главных проблем. В связи с этим, возникает необходимость применения численных методов к задачам сейсмодинамики подземных трубопроводов; усовершенствование методов их решения является актуальной задачей сейсмостойкости подземных трубопроводов. В этом направлении, приоритетной задачей является осуществление целенаправленных научных исследований. Особое внимание уделяется исследованию на основе широкого применения современной компьютерной техники по разработке новых методик расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) подземных систем жизнеобеспечения с учётом вязко–упруго–пластического взаимодействия трубопровода с окружающим грунтом, и различных видов сейсмического воздействия на него.

Особое внимание в мире уделяется высокой степени зависимости нормальной жизнедеятельности городов, особенно крупных, от бесперебойной работы таких систем жизнеобеспечения, как энергетические и транспортные, системы водоснабжения и канализации. Исследуется возможность появления различных вторичных повреждений в случае разрушения их при землетрясениях, возможность возникновения пожаров и опасного загрязнения экологической среды. В случае повреждения крупных газо- и нефтепроводов, требуется уделять особое внимание целенаправленному научному исследованию по усовершенствованию методов проектирования и строительства трубопроводных систем. В этой связи, учет разновидности сейсмического воздействия на подземные трубопроводы и, принятие движения грунтовой среды, окружающей трубопровод, в виде различных аналитических функций, являются одними из основных задач. В связи с этим, при учёте вязко-упруго-пластической модели взаимодействия подземного трубопровода с грунтом разработка методов определения напряженно деформированного состояние, оценка прочности и прогнозирование являются необходимыми задачами.

В настоящее время в нашей республике особое внимание уделяется бесперебойному обеспечению питьевой водой городов и сёл, принимаются меры по обеспечению бесперебойной работы водопроводных, канализационных, нефте- и газо- проводов, являющихся важными коммуникационными артериями экономики. В «Стратегии по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы» особо подчёркивается необходимость реализации таких целевых программ, как «...модернизация, техническое и технологическое обновление производства, реализация

проектов производственной, транспортно-коммуникационной и социальной структуры; ...последовательное внедрение современных экономических и эффективных технологий ...»<sup>2</sup>. При реализации данных задач, особое значение имеет создание методов определения напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов, разработка методов расчета прочности подземного трубопровода на сейсмические воздействия и развитие научно-исследовательских работ, имеющих научное и практическое значение в этом направлении.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениях Президента Республики Узбекистан №ПП-3190 от 9 августа 2017 г. «О мерах по совершенствованию проведения научных исследований в области сейсмологии, сейсмостойкого строительства и сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан», №ПП-3107 от 30 июня 2017 г. «О мерах по совершенствованию системы управления нефтегазовой отраслью», №ПП-3379 от 8 ноября 2017 г. «О мерах по обеспечению рационального использования энергоресурсов», №ПП-3682 от 27 апреля 2018 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», №ПП-3502 от 2 февраля 2018 г. «О мерах по обеспечению в 2018-2022 годах генеральными планами населенных пунктов, улучшению деятельности проектных организаций, а также повышению качества подготовки специалистов в сфере градостроительства» и №ПП-4794 от 30 июля 2020 г. «О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан» а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Математика, механика и информатика» и XIV. «Сейсмология, сейсмобезопасность зданий, сооружений и строительство».

**Степень изученности проблемы.** Научные исследования по прочности подземных трубопроводов при сейсмических нагрузениях выполнены многими известными учеными, в том числе: M.J. O'Rourke, L.R. Wang, N.M. Newmark, El. Hmadi, T. Takahashi, T. Tanaka, D. Wijewickreme, K. Yoshizaki, X.L. Liu, Д.Д. Барканом, В.А. Ильичевым, Я.М. Айзенбергом, Ш.Г. Напетваридзе, А.Г. Назаровым, Р.М. Мукурдумовым, А.Б. Айнбиндером, А.С. Гехманом, М.Ш. Исраиловым, А.А. Александровым, Р.А. Гумеровым, Э.Н. Фигаровым и др.

---

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» №УП-4947 от 7 февраля 2017 г.



Отечественными учеными проведены научно-исследовательские работы по повышению сейсмической прочности подземных трубопроводов, в том числе, академиком Т.Р.Рашидовым разработана динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. В этой области А.Абдусаттаров, Р.А.Абдикаримов, Р.А.Абиров, А.Каюмов, Е.Н.Колмакова, Ш.М.Маматкулов, Б.М.Мардонов, А.Х.Маткаримов, М.Мирсаидов, Я.Н. Мубораков, С.Мухамедова, В.А. Омельяненко, С.Ф.Проскурина, Т.Рашидов, Х.С.Сагдиев, К.Д.Салямова, И.Сафаров, Ш.М. Сибукаев, Т.Т.Собиров, К.С.Султанов, З.Р.Тешабаев, М.К. Усаров, Г.Х.Хожметов, А.А.Халджигитов, Б.Э.Хусанов, Т.Юлдашев, А.Юсупов и др. проводили исследования и достигли определенных результатов в изысканиях по расчету подземных трубопроводов с учетом свойств грунта, глубины заложения, геометрических размеров сооружений, а также взаимодействия труб с грунтовой средой и волнового характера воздействия.

В настоящее время, в республике вопросы развития теории прочности подземных трубопроводов при сейсмическом воздействии являются актуальной задачей и требуют серьезных научных исследований в этом направлении. По этой причине, решение задач по определению напряженно деформированного состояния подземного трубопровода с учётом нелинейности закона взаимодействия является актуальным аспектом. В действующем нормативном документе КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах», раздел IV «Подземные сооружения и инженерные сети» не содержатся специальные указания по расчету напряженно-деформированного состояния подобных сооружений. Анализ сейсмодинамики подземных трубопроводов зарубежных стран указывает на необходимость более глубокого изучения методов расчета.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т.Уразбаева АН РУз ФА-Ф-4-006 «Сейсмодинамика плоско и пространственно расположенных подземных трубопроводных систем при произвольном угле атаки воздействия» (2017–2019) и ФА-Атех-2018-67 «Оценка реакций подземных трубопроводов на действие набора реальных записей землетрясений и их внедрение» (2018–2020).

**Цель исследования** заключается в определении напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов, уложенных в грунт с вязко-упруго-пластическими свойствами взаимодействия на контакте, при действии сейсмической волны в виде бегущего синуса, бегущего импульса полуволны синуса и импульса в форме треугольника.

**Задачи исследования:**

разработать методику численного расчёта упругого и вязкоупругого взаимодействия трубы с грунтом, определить подходящую схему, метод конечных разностей для движения грунта в виде разрывной функции;

определить влияние коэффициентов упругости и вязкости взаимодействия и коэффициента упрочнения модели взаимодействия на состояние подземного трубопровода;

определить влияние движения грунта в виде бегущей синуса, бегущего импульса полуволны синуса и бегущего импульса в форме треугольника на НДС подземного трубопровода;

определить влияние массы узла, коэффициентов упругости и вязкости взаимодействия, период колебания и скорость распространения волны в грунте, форму импульсов при перемещении и деформации в подземном трубопроводе;

разработать методику численного расчета напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов при продольных колебаниях с учетом вязко-упруго-пластического взаимодействия в системе «труба–грунт».

**Объектом исследования** являются подземные трубопроводы (водопроводы, газопроводы, нефтепроводы и др.), расположенные в сейсмических зонах.

**Предмет исследования** – НДС подземных сооружений на основе использования модели А.А. Ильюшина при вязко-упруго-пластическом взаимодействии системы «труба-грунт» и влияние свойств грунта и формы сейсмического нагружения на деформированное состояние подземных трубопроводов.

**Методы исследования.** В процессе исследования применены методы механики деформируемого твердого тела и строительной механики, математического моделирования, определения динамического параметра для численного расчета – метод конечных разностей.

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в следующем:

усовершенствованы методы решения по широкому применению приближенной численной методики к задачам сейсмодинамики подземных трубопроводов;

разработаны результаты расчёта подземного магистрального трубопровода при вязко-упруго-пластическом взаимодействии, при сейсмическом воздействии в виде аналитической функции бегущей волны синуса, импульса полуволны синуса и импульса в форме треугольника;

разработано аналитическое решение задачи продольного колебания подземного трубопровода с узлами на концах, на основе использования метода Фурье. Проведено сравнение результатов с результатами, полученными численным методом, и доказана достаточная степень точности результатов, полученных численным методом;

разработана методика численного расчета напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов при продольных колебаниях с учетом вязко-упругого и вязко-упруго-пластического взаимодействия в системе «труба–грунт».

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

определено влияние коэффициентов упругости и вязкости взаимодействия и коэффициента упрочнения модели взаимодействия на перемещение и деформацию подземного трубопровода;

выявлено влияние формы импульса на НДС подземного трубопровода и зависимость значения НДС подземного трубопровода от скорости распространения волны и периода колебаний;

разработан программный комплекс, позволяющий на основе вычислительных экспериментов автоматизировать процесс решения задач сейсмодинамики подземных трубопроводов, расположенных в сейсмических зонах («Программа расчета подземных магистральных трубопроводов при различных видах сейсмического воздействия» № DGU 06814-2019 г.);

разработана методика расчета подземного трубопровода в сейсмических зонах, использованная при проектировании в ГУПе «Сувсоз» города Ташкента и на объекте «Eshonguzar house» Ташкентской области, что позволило повысить качество и эффективность работ, сократить время расчета в 1.25 раза, обеспечить снижение напряжения в подземном трубопроводе на 10–30 % с учетом сейсмической интенсивности строительной площадки.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследований основана на обеспечении корректности применения приближенных численных методов для решения задач сейсмодинамики подземных трубопроводов, на доказательстве достоверности полученных результатов с использованием современных методов и средств, на сопоставлении с известными результатами, а также сравнении результатов теоретических исследований с реальными данными, подтвержденными на практике.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в дальнейшем развитии сейсмодинамической теории подземных сооружений путем дополнения новыми материалами о напряженно-деформированном состоянии подземного трубопровода при нелинейном взаимодействии с грунтом. Разработанная методика численного расчета напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов, вязко-упруго-пластически взаимодействующих с грунтом, и математические модели описывают процессы сейсмодинамики подземных трубопроводов. Результаты диссертационной работы являются новым вкладом в теорию пластичности по вопросам влияния нелинейности взаимодействия НДС трубопроводов на контакте.

Практическая значимость работы заключается в том, что методика расчета сейсмодинамики подземных трубопроводов, вычислительные алгоритмы и комплексы программных средств в совокупности образуют единую концепцию формализации расчета сейсмодинамики подземных трубопроводов. Это существенно улучшает и ускоряет процесс проектирования и строительства указанных подземных трубопроводов (водо- и газоснабжения, нефтепроводы и др.) в сейсмических зонах, повышает

качество работ, служит значительному снижению сейсмического риска, а также способствует достижению стабильной работы сложных систем жизнеобеспечения, что предопределяет практическую значимость результатов исследования.

**Внедрение результатов исследования.** На основе научных результатов исследования процесса сейсмодинамики подземных трубопроводов получены следующие научные результаты:

внедрены методика расчета подземных трубопроводов при вязко-упруго-пластическом взаимодействии системы «труба-грунт», а также результаты исследования в процесс проектирования и эксплуатации подземных трубопроводов на предприятии ООО «HI-TECH DESIGN» (Акт внедрения от 1 ноября 2019 г. ООО «HI-TECH DESIGN»). Применение полученных результатов исследования в процессе проектирования, способствовали сокращению времени расчета в 1.25 раза, обеспечению устойчивости и запаса прочности объекта в 1.15;

внедрена методика расчета подземных трубопроводов при вязко-упруго-пластическом взаимодействии системы «труба-грунт» и вязко-упругом взаимодействии системы «труба-грунт» на сейсмическое воздействие в виде импульсов полуволны синуса и в форме треугольника при проектировании подземных трубопроводов в ГУПе «Сувсоз» (Акт внедрения от 22 октября 2019 г. От ГУП «Сувсоз»). Внедрение полученного научного результата дает возможность устойчивой работы трубопровода, увеличивает продолжительность времени службы в 1.6 раз, снижает напряжение в трубопроводе на 10–30% с учетом сейсмической интенсивности строительной площадки;

на внедрение полученных результатов исследования Министерством строительства Республики Узбекистан (Справка Министерства строительства Республики Узбекистан, №10391/ 09-07 от 30 декабря 2019 г.) получено положительное заключение.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационного исследования были обсуждены на научно-практических конференциях, в том числе на 4 международных и 4 республиканских.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано всего 16 научных работ. Из них 8 научных статей, в том числе 5 в республиканских и 3 в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации доктора философии (PhD).

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

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, выявлены объект

и предмет исследования, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов, внедрение в практику результатов исследования, приведены сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации – **«Системный анализ исследований в области сейсмостойкости подземных трубопроводов»** – приведены данные результатов исследования в теоретическом и экспериментальном аспектах развития сейсמודинамики подземных трубопроводов. Произведен аналитический обзор работ, выполненных отечественными учёными в области сейсмостойкости подземных и наземных сооружений. Охарактеризованы и проиллюстрированы на фотографиях повреждения подземных трубопроводов вследствие сильных землетрясений в мире.

Степень повреждения трубопроводов во время землетрясения зависит от целого ряда факторов: интенсивности сейсмического воздействия, геологических и гидрогеологических условий, эксплуатационно-технологических нагрузок и воздействий, конструкции трубопровода, характеристик материала труб, сроков его эксплуатации.

Грунты, окружающие подземные трубопроводы, являются не только источником сейсмического воздействия, но и участвуют в колебательном процессе совместно с самим трубопроводом. В зависимости от однородности и плотности окружающей трубопровод грунтовой среды, наличия мерзлоты и степени обводненности грунтов интенсивность проявления землетрясения и механизм взаимодействия сооружения с грунтом будут различными. В связи с этим, существенное значение приобретают эмпирические и экспериментальные исследования по анализу фактических данных о поведении подземных и наземных трубопроводов при сейсмических воздействиях.

В последние годы усилился научный интерес к проблеме безопасности землетрясений для подземных трубопроводов. Важными характеристиками подземных трубопроводов являются их охват больших площадей и подверженность различным геотектоническим опасностям. Еще одна особенность подземных трубопроводов, которая отличает их от наземных сооружений, заключается в том, что движение труб относительно окружающего грунта, как правило, мало, а силы инерции, обусловленные весом трубопровода и его содержимого, относительно неважны. Подземные трубопроводы могут быть повреждены либо постоянными движениями грунта, либо переходными сейсмическими волнами. Приводятся данные повреждения подземных трубопроводов вследствие сильных землетрясений, произошедших в мире.

Во второй главе диссертации – **«Колебания линейных магистральных трубопроводов с учётом вязкоупругих свойств контактного взаимодействия»** – рассматриваются простые традиционные задачи о

продольных колебаниях подземных магистральных трубопроводов при вязко-упругом взаимодействии в системе «труба–грунт». Описывается методика расчета колебаний подземного магистрального трубопровода при вязко-упругом взаимодействии с грунтом. Производится анализ решения задачи с различными граничными условиями и различными законами взаимодействия.

Рассмотрим трубу длиной  $L$ , уравнение движения которой имеет вид

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E \cdot F \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \pi \cdot D \cdot \tau = 0, \quad (1)$$

где  $u$  – осевое перемещение трубы;  $m$  – масса на единицу длины;  $E$  – модуль Юнга материала трубы;  $F = \pi \cdot (D^2 - (D - s)^2) / 4$  – площадь поперечного сечения трубы, где  $s$  и  $D$  – толщина и внешний диаметр трубы соответственно;  $\tau$  – касательное напряжение.

Для описания свойств вязко-упругого взаимодействия взята модель Кельвина–Фойгта, когда член с разностью скоростей перемещений трубы и грунта при продольном взаимодействии отвечает за волновой унос (накачку) энергии. В этой связи отношение между касательным напряжением трубы и грунтом запишем в виде

$$\tau = k_x \cdot (u - u_g) + \mu \cdot (\dot{u} - \dot{u}_g) / H, \quad (2)$$

где  $u_g$  – продольное перемещение грунта;  $k_x$  – коэффициент упругого взаимодействия в системе «труба–грунт»;  $\mu$  – коэффициент вязкого взаимодействия в системе «труба–грунт»;  $H$  – глубина заложения подземного трубопровода.

Если учтем касательное напряжение (2), то уравнение (1) примет вид

$$m \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E \cdot F \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \pi \cdot D \cdot \frac{\mu}{H} \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right) + \pi \cdot D \cdot k_x \cdot (u - u_g) = 0. \quad (3)$$

Начальные условия следующие:

$$u(x, 0) = 0 \quad \text{и} \quad \dot{u}(x, 0) = 0. \quad (4)$$

При рассмотрении трубы конечной длины необходимы граничные условия на торцах трубопровода. Рассмотрим три вида граничных условий.

Первый вид граничных условий для торцов подземного трубопровода, которые перемещаются одинаково с грунтом, запишутся в виде:

$$\text{а) } u(0, t) = u_g(0, t), \quad \text{б) } u(l, t) = u_g(l, t). \quad (5)$$

Второй вид граничных условий, для случая, когда деформация равна нулю на концах подземного трубопровода имеет вид:

$$\text{а) } \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \text{б) } \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=l} = 0. \quad (6)$$

Третий вид граничных условий запишется относительно продольной силы на упруго закрепленных концах трубопровода

$$\text{а) } EF \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = k_{N1} (u - u_g) \Big|_{x=0}, \quad \text{б) } EF \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} = -k_{N2} (u - u_g) \Big|_{x=l}. \quad (7)$$

Поскольку нет общепринятых методов прогнозирования фактического распространения сейсмических волн, большинство ученых представляют движение грунта одной синусоидальной волной. Перемещение грунта параллельное трубе можно записать в виде

$$u_g = \begin{cases} A \sin \omega(t - x / C_p), & \text{если } t > x / C_p, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (8)$$

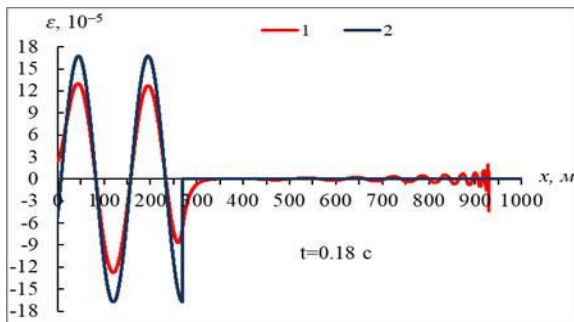
где  $A$  – максимальное смещение грунта,  $\omega$  – угловая скорость колебаний сейсмической волны, определяемая по формуле:  $\omega = 2\pi / T$ ;  $C_p$  – «кажущаяся скорость» распространения волны (далее – скорость распространения волны в грунте). «Кажущаяся скорость» распространения волны в грунте может быть большей за счёт угла падения волны к оси трубопровода или за счёт деформативности стыков трубопровода.

Характеристики стальной трубы:  $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ,  $D = 0.61 \text{ м}$ ,  $s = 0.01 \text{ м}$ ,  $m = 141.1 \text{ кг/м}$ .

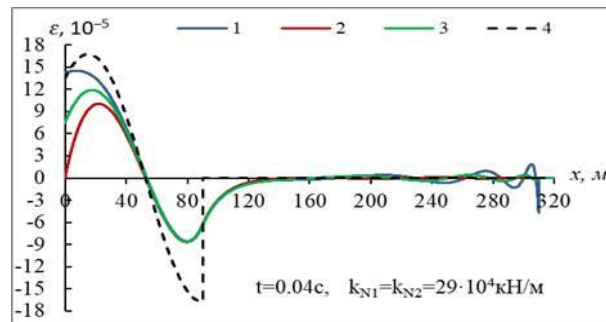
Характеристики грунта:  $k_x = 10^4 \text{ кН/м}^3$ ,  $\mu = 0 \text{ кН} \cdot \text{с/м}^2$ ,  $C_p = 1500 \text{ м/с}$ , период гармонической волны –  $T = 0.1 \text{ с}$ ,  $A = 0.004 \text{ м}$ ,  $H = 1 \text{ м}$ .

Задача решается на основе использования явной конечно-разностной схемы, выбором соотношения шагов по координате и времени в виде  $\Delta x / \Delta t = a_0$ , где  $a_0 = \sqrt{E \cdot F / m}$  – скорость распространения волны в трубопроводе. Расчёты проведены при  $\Delta x = 0.1 \text{ м}$ .

На основе разработанного алгоритма выполнена компьютерная реализация задачи, результаты которой приведены на рис.1, 2.



**Рис. 1.** Изменение деформации по координате: 1–волна в грунте; 2–волна в трубопроводе



**Рис.2.** Изменение деформации по координате: 1– с закрепленными концами; 2– со свободными концами; 3– с упруго закрепленными концами; 4–волна в грунте

Скорость распространения волны в стальном трубопроводе примем равной  $5120 \text{ м/с}$ , а в грунте эта скорость зависит от типа грунта. Допустим, что волна в грунте движется со скоростью  $1500 \text{ м/с}$ . На рис.1 показано изменение деформации в магистральном трубопроводе длиной  $1000 \text{ м}$ , когда

его оба торца закреплены в грунте. Здесь приблизительно на расстоянии 930 м от левого торца виден разрыв деформации, а за фронтом волны – «колебание» деформации, вызванное взаимодействием волны в трубопроводе с грунтом. Затухание величины разрыва деформации на фронте волны связано с дискретизацией задачи. Так как скорость распространения волны в трубопроводе больше скорости распространения волны в грунте, грунт до прихода в него волны в рассматриваемой точке пытается остановить движение сечений трубопровода. Непосредственно за фронтом волны в трубопроводе грунт сопротивляется, так что деформация на определенном расстоянии за фронтом меняет знак и постепенно, по мере удаления от фронта волны, колебания деформации затухают. Вместе с тем волна в грунте действует через боковую поверхность трубопровода и возбуждает в нем волну.

С увеличением коэффициента податливости закрепления амплитуда на фронте волны в трубопроводе увеличивается, не превышая значений при жестком закреплении (рис.2)

Таким образом, на трубопроводе распространяется фронт волны и ее значение равно половине максимального значения деформации в грунте. За счёт воздействия грунта с боковой поверхностью подземного трубопровода происходит движение трубопровода. Деформация, возникающая в подземном трубопроводе, по виду повторяет деформацию возникающую в грунте, хотя максимальное значение деформации в трубопроводе меньше, чем максимальное значение деформации в грунте.

В третьей главе диссертации – **«Напряженно-деформированное состояние подземного магистрального трубопровода при различных аналитических формах движения грунта»** – рассмотрена задача о воздействии продольной волны на трубопровод конечной длины, взаимодействующий с грунтом по упруговязкому закону. Торцы трубопровода закреплены к массивным узлам, которые взаимодействуют с окружающей средой по линейным законам. Кроме того, установлено влияние коэффициентов упругого и вязкого взаимодействия на подземный магистральный трубопровод при воздействии грунта в виде бегущей волны синуса.

Сравнительный анализ проводился с тремя типами граничных условий: свободно, жестко и податливо закрепленных в грунте. Расчет подземного магистрального трубопровода производился при воздействии бегущего импульса полуволны синуса и импульса в форме треугольника. Выполнен анализ НДС подземного трубопровода в зависимости от периода колебания, скорости распространения волны в грунте и коэффициента податливости на границах. Кроме того, рассмотрено влияние формы импульса на картину движения подземного трубопровода. Сравнены результаты для движения грунта в виде импульса полуволны синуса и импульса в форме треугольника. Показано также увеличение максимального значения подземного трубопровода за счёт наложения волн трубы и грунта.



Для упрощения постановки задачи принимаем следующее: наличие трубопровода не влияет на волновое поле вблизи него.

Поскольку волновое поле за фронтом поверхностной волны зависит от глубины грунтовой среды, рассмотрим осредненные смещения частиц грунтовой среды вдоль оси трубопровода.

Внешняя поверхность трубопровода контактирует с грунтом вдоль оси трубопровода по упруговязкому закону, а торцы трубопровода сопряжены с массивными узлами через упругие элементы

С учетом этих предположений уравнение продольных колебаний трубопровода и граничные условия записываются в следующем виде:

$$\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_0[u - u_g(x, t)] + \gamma_0 \left[ \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right] = 0, \quad 0 < x < l, \quad (9)$$

$$m_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = EF \frac{\partial u}{\partial x} - k_1 [u - u_g(0, t)] \quad \text{при } x = 0, \quad (10)$$

$$m_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -EF \frac{\partial u}{\partial x} - k_2 [u - u_g(l, t)] \quad \text{при } x = l. \quad (11)$$

$$\text{Начальные условия нулевые, т.е.: } u = 0, \quad \dot{u} = 0 \quad (12)$$

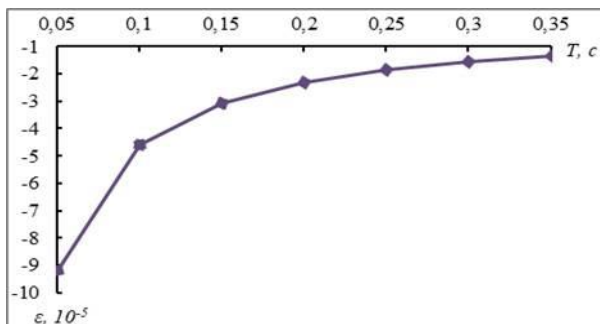
где  $E, \rho$  – модуль Юнга и плотность материала трубопровода;  $F, l$  – площадь поперечного сечения и длина трубопровода;  $k_0$  – коэффициент продольного взаимодействия трубопровода с окружающей средой;  $m_1$  и  $m_2$  – массы узлов,  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты жесткости.

При движении грунта в виде (8), начальная краевая задача (10)–(12) для уравнения (9) решена методом Фурье и получены результаты.

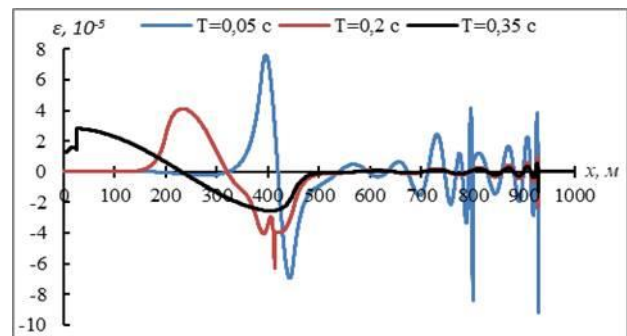
Движение грунта задается в виде импульса в форме полуволны синуса

$$u_g = \begin{cases} A \cdot \sin \omega (t - x / C_p), & 0 \leq t - x / C_p \leq T / 2, \\ 0, & T / 2 < t - x / C_p \text{ и } t - x / C_p < 0. \end{cases} \quad (13)$$

На основе разработанного алгоритма выполнена компьютерная реализация задачи, приведены результаты для движения грунта в виде импульса полуволны синуса (13).



**Рис.3. Изменение деформации на переднем фронте по периоду колебаний грунта.  $C_p=2500$  м/с**



**Рис.4. Изменение деформации по координате при  $C_p=2500$  м/с,  $k_x=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>**

Как отмечалось, период колебания грунта влияет на максимум деформации, и на значение деформации на фронтах. На рис. 3 и 4 показано изменение деформации на переднем фронте волны от периода колебаний грунта: с увеличением периода колебаний грунта деформация уменьшается.

Период колебания полуволны синуса обратно пропорционален зависимости деформации грунта. Трубопровод и грунт деформируются приблизительно одинаково при  $T > 0.3$  с. В остальном, деформация грунта больше деформации трубопровода.

Движение грунта задается в виде импульса в форме треугольника:

$$u_g = \begin{cases} 4A \cdot (t - x/C_p) / T, & 0 \leq t - x/C_p \leq T/4, \\ 2A \cdot [1 - 2(t - x/C_p) / T], & T/4 \leq t - x/C_p \leq T/2, \\ 0, & T/2 < t - x/C_p \text{ и } t - x/C_p < 0, \end{cases} \quad (14)$$

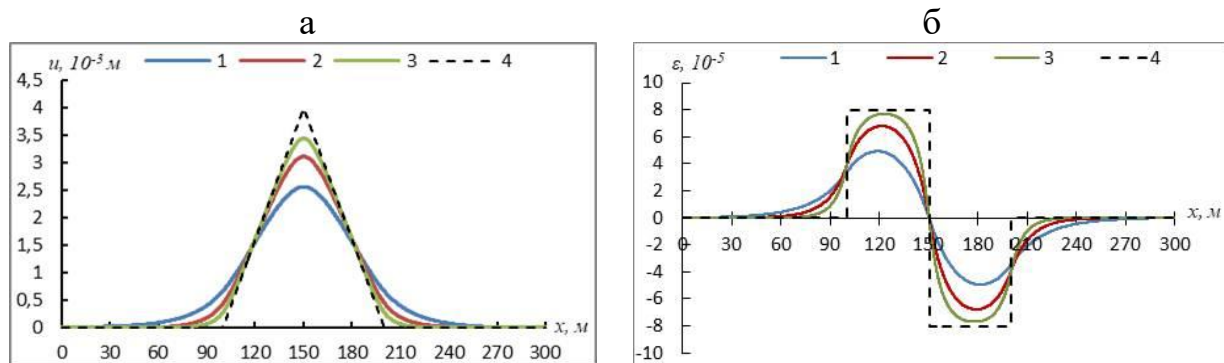
Движение грунта можно записать в деформациях, тогда уравнение (14) примет вид

$$\varepsilon_g = \begin{cases} -4A / (T \cdot C_p), & 0 \leq t - x/C_p \leq T/4, \\ 4A / (T \cdot C_p), & T/4 \leq t - x/C_p \leq T/2, \\ 0, & T/2 < t - x/C_p \text{ и } t - x/C_p < 0. \end{cases} \quad (15)$$

Волна в грунте представлена в виде импульса в форме треугольника (14), тогда скорость частиц грунта в волне будет меняться по ступенчатой функции (15). Поэтому на фронте волны перемещение грунта равно нулю, а скорость частиц имеет скачок.

Движение грунта в виде (15) в трёх точках имеет разрывы первого рода. При переходе этих разрывов деформации через концы трубопровода распространяется разрывный фронт. Значение деформации на фронте при жестко закрепленном трубопроводе приблизительно равняется половине значения скачка деформации грунта. При полном переходе импульса через левый торец подземного трубопровода распространяются три фронта волны деформации.

При малых значениях времени действия импульса упругий коэффициент взаимодействия значительно влияет на максимальное значение перемещения (рис.5,а) и деформации (рис.5,б) в трубопроводе.



**Рис.5. Изменение перемещения (а) и деформации (б) по координате: 1– $k_x=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>; 2– $k_x=1.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>; 3– $k_x=4 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>; 4–волна в грунте.**

Анализ импульсов показал, что форма, время действия и скорость распространения импульса имеют существенное значение для НДС подземного трубопровода.

Разработанная прикладная программа для компьютера позволяет получить ряд численных результатов в зависимости от параметров трубопровода, грунтовых условий и различных закреплений концов при разных сейсмических воздействиях. Тем самым появляется возможность автоматизирования исследования напряженно-деформируемого состояния трубопроводов при направлении сейсмического воздействия вдоль оси трубопровода.

В четвертой главе диссертации – «**Сейсродинамика подземных трубопроводов при вязко-упруго-пластическом взаимодействии с грунтом**» – рассматриваются задачи о продольных колебаниях подземных трубопроводов при вязко-упруго-пластическом взаимодействии в системе «труба–грунт». Описывается методика расчета колебаний подземного трубопровода при вязко-упруго-пластическом взаимодействии с грунтом. Разрабатываются алгоритм компьютерной реализации и решение задач напряженно-деформируемого состояния подземных трубопроводов при нелинейном взаимодействии с окружающим грунтом. Производится анализ решения задачи с различными граничными условиями. В перспективе предусматривается создание общих универсальных комплексных программ по исследованию сейсродинамики различных трубопроводных систем, что позволит ускорить процесс проектирования и строительства подземных сооружений в сейсмических районах. Для проверки достоверности мы сравнили новые результаты с полученными ранее. Используемые схемы расчета позволили решить ряд новых задач по сейсродинамике подземных трубопроводов.

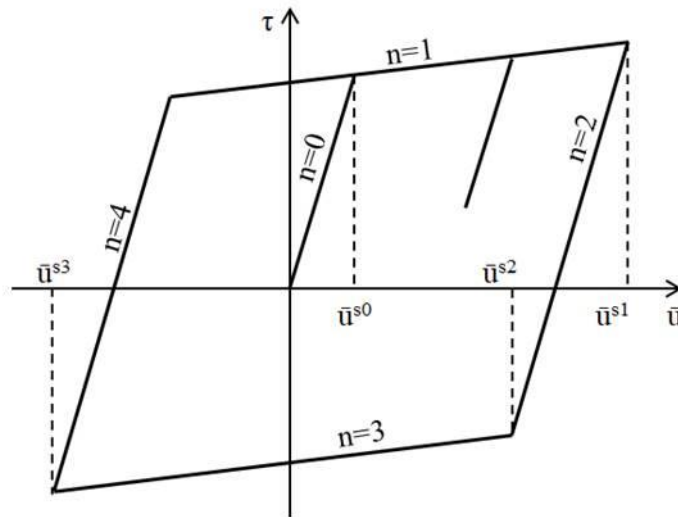
Уравнение продольного колебания подземного трубопровода при вязко-упруго-пластическом взаимодействии с грунтом записывается в виде

$$m \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} - EF \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \pi D \tau_n = EF \frac{\partial^2 u_g}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} \quad (16)$$

Касательные напряжения на контактной поверхности подземного трубопровода при  $n = 0, 1, 2, 3, 4$  равны:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \bar{u}, \\ \tau_1 &= (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \tilde{u}^{s0} + k'_x (\bar{u} - \tilde{u}^{s0}), \\ \tau_2 &= (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \tilde{u}^{s0} + k'_x (\tilde{u}^{s1} - \tilde{u}^{s0}) + k_x (\bar{u} - \tilde{u}^{s1}), \\ \tau_3 &= (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \tilde{u}^{s0} + k'_x (\tilde{u}^{s1} - \tilde{u}^{s0}) + k_x (\tilde{u}^{s2} - \tilde{u}^{s1}) + k'_x (\bar{u} - \tilde{u}^{s2}), \\ \tau_4 &= (\mu / H) \dot{\bar{u}} + k_x \tilde{u}^{s0} + k'_x (\tilde{u}^{s1} - \tilde{u}^{s0}) + k_x (\tilde{u}^{s2} - \tilde{u}^{s1}) + k'_x (\tilde{u}^{s3} - \tilde{u}^{s2}) + k_x (\bar{u} - \tilde{u}^{s3}), \end{aligned}$$

где  $\bar{u}$  – относительные перемещения,  $\tilde{u}^{s\bar{i}}$  – новый предел упругости взаимодействия на  $\bar{i}$ -м этапе движения

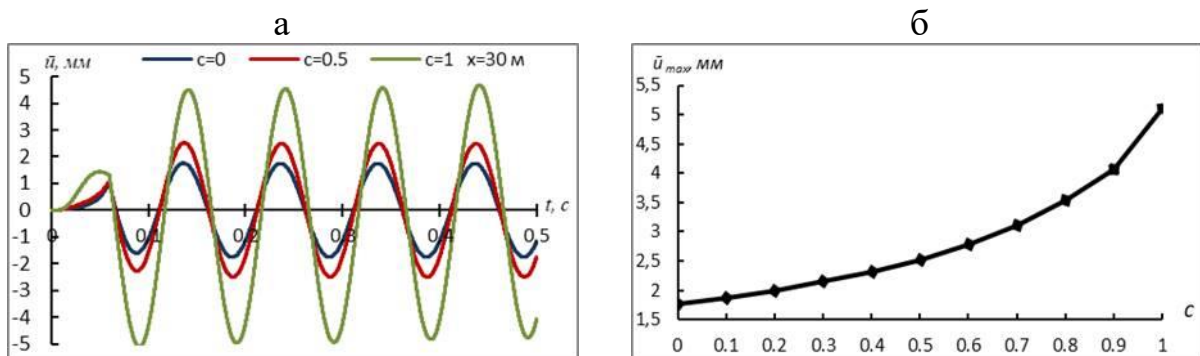


**Рис.6. Диаграмма зависимости  $\tau \sim \tilde{u}$ , соответствующая билинейному закону взаимодействия**

Для решения уравнения (16) используем неявную схему метода конечных разностей второго порядка точности.

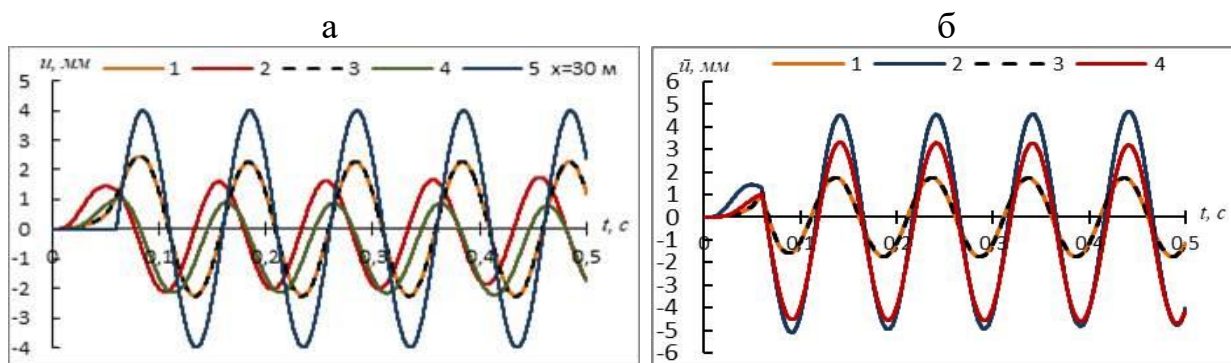
Механические и геометрические параметры задаются следующими:  $E=2.1 \cdot 10^{11}$  Па;  $\rho = 7.8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $D_H=0.61$  м;  $D_B=0.6$  м;  $F = \pi(D_H^2 - D_B^2) / 4$  м<sup>2</sup>;  $l = 100$  м;  $\omega = 2\pi / T$ ;  $A_p=4$  мм;  $T = 0.2$  с;  $C_p = 800$  м/с;  $k_x=2 \cdot 10^7$  Н/м<sup>3</sup>;  $u_s=0.1$  мм.

На основе разработанного алгоритма выполнена компьютерная реализация задачи, результаты которой приведены на рис.7, 8. На рис 7 показано увеличение максимальных значений относительных перемещений с изменением  $c = (k_x - k'_x) / k_x$  – коэффициента упрочнения модели взаимодействия от 0 до 1.



**Рис.7. Изменение относительного перемещения по времени (а) и изменение максимального значения относительного перемещения по коэффициенту  $c$  (б)**

Вид закрепления на границах подземного трубопровода мало влияет на перемещение подземного трубопровода при вязко-упругом взаимодействии системы «труба–грунт». Но, как показано на рис.8, при вязко-упруго-пластическом взаимодействии для коэффициента упрочнения модели взаимодействия  $c=1$  влияние граничных условий на максимальное значение абсолютного и относительного перемещения значительно.



**Рис.8. Изменение абсолютного (а) и относительного (б) перемещения по времени: 1– $c=0$ , закрепленные концы; 2–  $c=1$ , закрепленные концы; 3– $c=0$ , свободные концы; 4– $c=1$ , свободные концы; 5– в грунте.**

Сравнительный анализ показывает, что учет нелинейности взаимодействия трубопровода с грунтом приводит к увеличению относительного перемещения между трубой и грунтом и к уменьшению значения нормального напряжения трубопровода. При закрепленных к грунту граничных условиях максимальное относительное перемещение больше, чем при свободных граничных условиях при учете нелинейности взаимодействия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённых исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему: «Сейсмодинамика вязко-упруго-пластического взаимодействия подземного трубопровода с грунтом (линейные и нелинейные задачи)» представлены следующие выводы:

1. Разработаны численный метод и программные продукты по расчету напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов, уложенных в естественных грунтах. Построены методики и программы расчета с учетом грунтовых условий, в том числе, учитывающие глубину заложения, закрепление концов трубопровода при решении задач сейсмостойкости.

2. Каждый конкретный случай доведен до числовых значений. Определяются опасные сечения возникновения максимальных нормальных напряжений при воздействии сейсмических нагрузок на подземный трубопровод. С целью доказательства достоверности выбранного численного метода проведен анализ в сравнительном аспекте полученных результатов с результатами ранее решенных задач.

3. Учитывая научный опыт работ зарубежных и отечественных ученых в области сейсмостойкости подземных трубопроводов, дифференциальные уравнения продольного колебания подземного трубопровода, подходящие для решения задач, в случае, когда деформация грунта принимается в виде разрывной функции, решаются численно по явной схеме методом конечных

разностей, удовлетворяющим условиям Куранта. Результаты, полученные с помощью этого метода, достаточно хорошо совпадают с результатами точных решений.

4. Выведена функция движения грунта в виде аналитических функций, таких как бегущая волна синуса, импульс полуволны синуса и импульс в форме треугольника. На основе использования распространения волны в виде бегущей волны синуса определено, что за счет жесткого закрепления на торцах в подземном трубопроводе распространяется фронт волны деформации со значением, равным половине значения максимальной деформации в грунте.

5. В подземном трубопроводе при вязко-упругом взаимодействии системы «труба–грунт» выявлено, что за счёт уноса энергии фронт волны в трубопроводе затухает и выходит к стационарному движению с грунтом. Для случая жестких пород грунта деформация трубопровода совпадает с деформацией грунта.

6. Выведена расчётная схема для продольного колебания подземного трубопровода при вязко-упруго-пластическом взаимодействии. Цикл работы подземного трубопровода при вязко-упруго-пластическом взаимодействии усложняется при переходе от одной стадии в другую. Поэтому выбор подходящей схемы позволяет получить корректное решение. На основе анализа схем метода конечных разностей выбрана неявная схема.

7. Уложение подземного трубопровода в траншею при условии рыхлых и дисперсных грунтов приводит к уменьшению деформации и, соответственно, к уменьшению напряжений. Использование грунта с меньшим пределом упругости взаимодействия способствует снижению напряжений в подземном трубопроводе, но возрастанию при этом перемещения трубы.

8. Практическая важность результатов непосредственно вытекает из самой постановки задач. Поэтому научно-исследовательские работы не только завершены алгоритмами и программами расчета на компьютере, но и доведены до конечных практических результатов. Они позволяют существенно дополнить нормативный документ КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах», раздел IV «Подземные сооружения и инженерные сети».

9. Полученные результаты использованы при проектировании подземных трубопроводов (объекты «Eshonguzar house», Ташкентская область; ГУП «Сувсоз», город Ташкент), что способствовало повышению качества и эффективности подземных работ на 10%, сокращению времени расчета в 1.25 раза и снижению напряжения в подземном трубопроводе на 10–30%.

Соискатель выражает глубокую благодарность академику АН РУз, д.т.н. проф. Т.Р. Рашидову, д.ф.-м.н., проф. К.С.Султанову д.ф.-м.н., проф. Б.Мардонову и д.т.н проф. Г.Х.Ходжиметову за ценные советы, благодаря которым рукопись диссертационной работы значительно улучшилась.

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

---

**INSTITUTE OF MECHANICS AND SEISMIC STABILITY OF  
STRUCTURES NAMED AFTER M.T. URAZBAYEV**

**KHUSAINOV RAKHMATJON BAKHRAMBAYEVICH**

**SEISMODYNAMICS OF VISCOUS-ELASTIC-PLASTIC  
INTERACTION OF UNDERGROUND PIPELINE WITH SOIL  
(LINEAR AND NONLINEAR PROBLEMS)**

01.02.04 – Mechanics of Deformable Rigid Bodies

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF PHILOSOPHY DOCTOR (PhD)  
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

**Tashkent 2021**

The theme of doctoral dissertation (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2018.2.PhD/FM233.

The doctoral dissertation has been prepared in the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T. Urazbaev of the Academy of Science of the Republic of Uzbekistan

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website [www.instmech.uz](http://www.instmech.uz) and at information and educational portal “Ziyonet” at address [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)

**Scientific adviser:**

**Rashidov Tursunboy Rashidovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Academician

**Official opponents:**

**Safarov Ismoil Ibrohimovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor

**Abdikarimov Rustamkhan Alimkhanovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Leading organization:**

**Samarkand State University**

The defense will take place «16» July 2021 at 10<sup>00</sup> o'clock at the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.T/FM.61 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of AS RUz (Address: 100125, Tashkent, Durmon Yuli street, 33, Conference hall –1. Tel.: (99871) 262-71-52; fax: +(99871) 262-71-32, e-mail: [instmech@academy.uz](mailto:instmech@academy.uz)).

The dissertation is available in the Information Resource Center of the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (registration number 9). (Address: 100125, Tashkent, Durmon Yuli street, 33, Tel.: (99871) 262-71-52; fax: +(99871) 262-71-32).

The abstract of the dissertation was circulated on «28» June 2021.  
(mailing report № 5 on «16» June 2021 year).



**M.M.Mirsaidov**

Chairman of Scientific Council for awarding degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician

**M.K.Usarov**

Scientific secretary of Scientific  
Council for awarding degrees,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**R.A.Abirov**

Chairman of scientific seminar at the scientific  
Council for the awarding degrees,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences



## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

### **The aim of the research work is:**

To develop a method for the numerical calculation of elastic and visco-elastic interaction of the pipe with the soil. Determination of a suitable scheme, finite difference method for soil motion in the form of a discontinuous function;

To determine the influence of elasticity and viscosity coefficients of interaction and compaction coefficient on the state of an underground pipeline;

To determine the effect of ground motion in the form of a running sine, a running pulse of the half-wave of the sine and a running pulse in the shape of a triangle on the stress-strain state (SSS) of an underground pipeline;

To develop a methodology for the numerical calculation of the stress-strain state of underground pipelines under longitudinal vibrations taking into account visco-elastic-plastic interactions in the pipe-soil system.

**The object of the research work** is underground pipelines (water pipes, gas pipelines, oil pipelines, etc.) located in seismic zones.

### **Scientific novelty of the research work** consists in the following:

methods for solving the widespread use of approximate numerical methods to the problems of seismodynamics of underground pipelines were improved;

more accurate results were obtained; the calculation of the underground main pipeline under seismic action in the form of the analytic function of the traveling sine wave, the sine half-wave pulse and the triangle-shaped pulse;

the influence of the elasticity and viscosity coefficients of the interaction and the compaction coefficient on the motion and strain of the underground pipeline were determined;

the influence of the pulse shape on the SSS of the underground pipeline was determined. In addition, the value of the SSS of the underground pipeline depends on the velocity of wave propagation and the period of oscillation;

a method for the numerical calculation of the stress-strain state of underground pipelines under longitudinal vibrations taking into account the visco-elastic and visco-elastic-plastic interactions in the pipe-soil system was developed;

**Implementation of research results.** Based on the scientific results of the study of the process of seismic dynamics of underground pipelines, the following were obtained:

the methodology for calculating underground pipelines with visco-elastic-plastic interaction of the pipe-soil system and research results were introduced into the design and operation of underground pipelines at the «HI-TECH DESIGN» LTD enterprise (Act of implementation of November 1, 2019, from «HI-TECH DESIGN» LTD). The research results in the design process helped to reduce the calculation time by 1.25 times, ensuring the stability and safety margin of the object by 1.15;

the methodology for calculating underground pipelines with visco-elastic-plastic interaction of the pipe-soil system and viscoelastic interaction of the pipe-soil system for seismic impact in the form of sine wave half-wave pulses and in the form of a triangle were introduced when designing underground pipelines at «Suvsoz» State Unitary Enterprise (Implementation Act of October 22, 2019 SUE

“Suvsoz”). The introduction of the scientific result makes it possible to ensure stable operation of the pipeline and increases the service life by 1.6 times, reducing the stress in the pipeline by 10-30%, taking into account the seismic intensity of the construction site;

At present the results of the study were implemented in the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan (Certificate of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan, No. 10391 / 09-07 of December 30, 2019) and a positive resolution was obtained.

**Publication of research results.** On the theme of the dissertation 16 scientific works were published, including 1 author's certificates (patent), 8 scientific articles, 5 of them – in republican and 3 – in foreign journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of the dissertation of the Philosophy Doctor (PhD)

**The volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of reference and appendices. It contains 120 pages of typewritten text.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

1. Хусаинов Р.Б. Поведение подземного магистрального трубопровода при воздействии бегущего импульса в форме треугольника.// журнал ПВПМ, – Ташкент,2020, – №1. – С 50-58. (01.00.00; №4).
2. Khusainov, R.B. Longitudinal Deformation Wave in a Buried Pipeline Subject to Viscoelastic Interaction with Soil.// Soil Mech Found Eng// Springer. – 2020. – №.56. – P.420–426.(IF 0.542)<https://doi.org/10.1007/s11204-020-09625-8>
3. Khusainov R. B. Seismodynamics of Underground Pipelines during Visco-Elastic-Plastic Interaction with Soil // IJARSET, India, 2020, January, Vol. 7, Issue 1. P. 12468–12474. (SJIF 6.126)
4. Хусаинов Р.Б. Продольная волна деформации в подземном трубопроводе при вязкоупругом взаимодействии с грунтом // Журнал ОФМГ. – М., 2019. – №6. – С. 19–23 (01.00.00; №33).
5. Хусаинов Р.Б. О необходимости учёта волнового уноса энергии в задачах расчёта подземных магистральных трубопроводов // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2018. – №4. – С.107–111. (01.00.00; №4).
6. Хусаинов Р.Б. Оценка влияния силы инерции на продольные колебания подземных трубопроводов// Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2017. – №4. – С. 72–75. (01.00.00; №4).
7. Хусаинов Р.Б. Анализ продольных колебаний подземного трубопровода при упругом и вязкоупругом взаимодействиях с грунтом при различных граничных условиях// Узбекский журнал «Проблемы механики», – Ташкент, 2017. – №1. – С. 86–90 (01.00.00; №4).
8. Мирзаев И., Хусаинов Р.Б., Особенности воздействия импульса деформации, распространяющегося в грунте, на подземный магистральный трубопровод // “Деформацияланувчан қаттиқ жисмлар механикаси” мавзусидаги республика илмий-амалий анжуман. 25 октябрь 2018 й. – Тошкент, 2018. – Б. 323–328
9. Хусаинов Р.Б. Вязко-упругое взаимодействие подземного магистрального трубопровода с грунтом// International conference «Prospects for the intensive approach to innovative development». 10-11 July 2018 y. – Namangan, 2018. – P. 338–341.
10. Мирзаев И., Хусаинов Р.Б. Численное исследование формирования продольной волны деформации в подземном магистральном трубопроводе// «Ўзбекистонда геотехника муаммолари ва уларнинг замонавий ечимлари» Республика илмий-амалий анжумани материаллари. 16-17 апрел 2018 й. – Ташкент, 2018. – Б. 235–240.
11. Хусаинов Р.Б. Численное исследование формирования продольной волны деформации в подземном магистральном трубопроводе// International scientific conference «Global science and innovations 2019: Central Asia» Astana,

Kazakhstan, March 2019. Материалы V международной научно-практической конференции. 18 марта 2019 г. – Астана, 2019. Т.VI. – С. 111–115.

12. Хусаинов Р.Б. Исследование квазистатической задачи продольного колебания подземных трубопроводов// Международная научно-практическая конференция «Приложение математики в экономических и технических исследованиях». 10 мая 2019 г. – Магнитогорск, Россия, 2019. – С 137–142.

13. Хусаинов Р.Б. Колебания подземного трубопровода при упругом и вязкоупругом взаимодействиях с грунтом // I Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы внедрения инновационной техники и технологий на предприятиях по производству строительных материалов, химической промышленности и в смежных отраслях». 24–25 мая 2019 г. – Фергана, Узбекистан, 2019.Т.1. – С 321–325.

14. Khusainov S.B., Khusainov R.B. Evaluation of the effect of inertia on the longitudinal vibrations of underground pipelines// I Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы внедрения инновационной техники и технологий на предприятиях по производству строительных материалов, химической промышленности и в смежных отраслях». 24–25 мая 2019 г. – Фергана, Узбекистан, 2019. Т.1. – С 315–318.

15. Хусаинов Р.Б. Анализ влияния силы инерции в исследованиях продольных колебаний подземных трубопроводов // “Фан ва таълимни ривожлантиришда ёшларнинг ўрни” Республика илмий-назарий конференция материаллари тўплами, 24 ноябрь 2017 й. – Ташкент, 2017. – Б 61–63.

16. Хусаинов Р.Б. Расчёт подземных трубопроводов конечной длины на действие кратковременной сейсмической нагрузки // Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми», Том 2, 9-10 ноября 2016 г. – Бухара, 2016. – С.155-158.

17. Хусаинов Р.Б. Программа расчета подземных магистральных трубопроводов при различных видах сейсмического воздействия// Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство № DGU 06814. 17.06.2019 г.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари  
«Механика муаммолари» Ўзбекистон журнали таҳририясида таҳрирдан  
ўтказилди

Бичими 60x84<sub>1/16</sub>. Ризограф босма усули. Times гарнитураси.  
Шартли босма табоғи: 2.75. Адади 100. Буюртма № 28.

«ЎзР Фанлар Академияси Асосий кутубхонаси» босмахонасида чоп этилган.  
Босмахона манзили: 100170, Тошкент ш., Зиёлилар кўчаси, 13-уй.





