

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.18/30.12.2019.Т.09.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ АСОСИДА БИР МАРТАЛИК ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**МЕХАНИКА ВА ИНШОТЛАР СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ  
ИНСТИТУТИ**

**БЕКМИРЗАЕВ ДИЁРБЕК АБДУГАППОРОВИЧ**

**ЕР ОСТИ ФАЗОВИЙ ҚУВУРЛАР ТИЗИМИ СЕЙСМОДИНАМИКАСИ  
УСУЛЛАРИНИ РИВОЖЛАНТИРИШ**

**05.09.02 – Асослар, пойдеворлар ва ер ости иншоотлари. Кўприклар ва транспорт  
тоннеллари. Йўллар, метрополитенлар  
01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021 йил**

**Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата докторской диссертации (DSc)**

**Contents of the doctoral (DSc) Dissertation Abstract**

<b>Бекмирзаев Диёрбек Абдугаппорович</b> Ер ости фазовий қувурлар тизими сейсמודинамикаси усулларини ривожлантириш.....	3
<b>Бекмирзаев Диёрбек Абдугаппорович</b> Развитие методов сейсמודинамики подземных пространственных трубопроводных систем.....	29
<b>Bekmirzaev Diyorbek Abdugapporovich</b> Development of seismodynamics methods of underground spatial pipeline systems.....	55
<b>Эълон қилинган ишлар рўйхати</b> Список опубликованных работ List of published works.....	59

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.18/30.12.2019.Т.09.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ АСОСИДА БИР МАРТАЛИК ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**МЕХАНИКА ВА ИНШОТЛАР СЕЙСМИК МУСТАҲКАМЛИГИ  
ИНСТИТУТИ**

**БЕКМИРЗАЕВ ДИЁРБЕК АБДУГАППОРОВИЧ**

**ЕР ОСТИ ФАЗОВИЙ ҚУВУРЛАР ТИЗИМИ СЕЙСМОДИНАМИКАСИ  
УСУЛЛАРИНИ РИВОЖЛАНТИРИШ**

**05.09.02 – Асослар, пойдеворлар ва ер ости иншоотлари. Кўприклар ва транспорт  
тоннеллари. Йўллар, метрополитенлар  
01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021 йил**

**Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2021.2.DSc/T331 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (реюзме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси ([www.tstu.uz](http://www.tstu.uz)) ва “ZiyoNet” Ахборот таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий маслаҳатчи:**

**Рашидов Турсунбай**

техника фанлари доктори, профессор, академик

**Расмий оппонентлар:**

**Расулов Ҳаят Зайирович**

техника фанлари доктори, профессор

**Хусанов Бахтияр Эргашбаевич**

физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим

**Миралимов Мирзохид Хамитович**

техника фанлари доктори

**Етакчи ташкилот:**

**Фарғона политехника институти**

Диссертация химояси Тошкент давлат транспорт университети ҳузуридаги DSc.18/30.12.2019.T.09.01 рақамли илмий кенгаш асосида тузилган бир марталик илмий кенгашнинг 2021 йил “**25**” **июнь** соат **9<sup>00</sup>** даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100167, Тошкент ш., Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй. Тел./факс: (+99871) 299-00-01, e-mail: rektorat(@tstu.uz, tashiit@exat.uz).

Диссертация билан Тошкент давлат транспорт университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (**024** рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100167, Тошкент ш., Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй. Тел.: (+99871) 299-00-01.

Диссертация автореферати 2021 йил “**12**” **июнь** куни тарқатилди.  
(2021 йил “**22**” **май** даги **1** рақамли реестр баённомаси).



**А.А. Рискулов**

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

**Н.А. Нишонов**

Илмий даражалар берувчи бир марталик илмий кенгаш илмий котиби, PhD, к.и.х.

**А.А. Ишанходжаев**

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

## КИРИШ (докторлик (DSc) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда, хусусан АҚШ, Хитой, Япония, Россия, Туркия, Ҳиндистон, Италия, Эрон ва бошқа давлатларда, ер ости газ-, сув-, нефт-, иссиқлик таъминоти ва канализация қувурларининг сейсмик хавфсизлиги ва сейсмик мустаҳкамлигини ривожлантиришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Қувурлар тизими сув таъминоти ва оқова сувларини чиқариб ташлаш, табиий газ ва суюқ ёқилғи, энергия ва коммуникациялар билан таъминлаш учун нафақат замонавий ҳаётда қўлланилади, балки офатларни бошқариш ва зилзилаларнинг оқибатларини бартараф этишда ҳам муҳим ўрин эгаллайди. Шу сабабли, кучли зилзилалар каби экстремал шароитларда, айниқса ушбу иншоотларда катта миқдордаги захарли ва ёнувчи материаллар мавжуд бўлганда ва ташиб берилганда, уларнинг тизимли хавфсизлиги таъминланган бўлиши лозим. Бу борада ривожланган хорижий давлатларда маълум ютуқларга эришилган бўлиб, дунё бўйича ривожланиб кенгаяётган шаҳарларда сейсмик хавфсизликни таъминлаш, зилзилабардош иншоотларни лойиҳалаш ва қурилишига катта эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда турли грунт шароитларида жойлашган ер ости ҳаётни таъминлаш тизимларининг сейсмик мустаҳкамлиги муаммоларини янада чуқурроқ тадқиқ этишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада “қувур-грунт” ўзаро таъсир моделини қуриш учун виброплатформа ва центрифугада моделлаштирилган лаборатория экспериментал тадқиқотларини грунт ва кумларда ўтказиш, бутун бир қувурлар тизимининг сейсмик заифлигини тушунтириб бериш учун, унинг бир қисмидан иборат тўғри чизиқли қувурни зилзиладаги акс таъсирининг асослаш, сейсмик юклама таъсиридаги Г, II ва Т шаклдаги қувурларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини (КДХ) ва ер ости иншоотининг грунт билан ўзаро таъсирини математик тавсифлаш, назарий ва амалий тадқиқотларининг асосий зарур масалаларидан бири бўлиб ҳисобланмоқда.

Мустақиллик шароитида, айниқса кейинги йилларда Ўзбекистон Республикасининг сейсмик ҳудудларида газ, нефт, нефт-кимё ва бошқа қўплаб саноат тармоқлари ривожланиб бормоқда, сейсмик юкламалар таъсиридаги ер ости иншоотларининг сейсмик мустаҳкамлигини таъминлашга қаратилган кенг қўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан “...аҳолининг коммунал-маиший хизматлар билан таъминланиш даражасини ошириш, энг аввало, янги ичимлик суви тармоқларини қуриш, ... қишлоқ жойларда тоза ичимлик суви билан таъминлашни тубдан яхшилаш...”<sup>1</sup> юзасидан вазифалар белгиланган. Мазкур вазифани амалга оширишда турли мураккаб геометрик шаклга эга ва махсус грунт шароитларида ер ости ҳаётни таъминлаш тизимларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати тўғрисида тўлиқ илмий

---

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

маълумотни олиш, ихтиёрий йўналган сейсмик юкламалардаги уланиш чоклари билан бириктирилган ер ости қувурларини ҳисоблаш, фазовий қувурлар тизимининг зилзилабардошлик масалаларини ечишнинг ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш, реал зилзила ёзувлари кўринишидаги сейсмик кучлар таъсиридаги ер ости қувурлари сейсмодинамикаси масалаларини ҳисоблаш услубларини такомиллаштириш масалалари муҳим аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2020 йил 30 июлдаги ПҚ-4794–сон “Ўзбекистон Республикаси аҳолиси ва ҳудудининг сейсмик хавфсизлигини таъминлаш тизимини тубдан такомиллаштириш чоратadbирлари тўғрисида”ги Қарори ҳамда Вазирлар Маҳкамасининг 2020 йил 26 августдаги 515–сон “Ўзбекистон Республикаси Фавқулудда вазиятларнинг олдини олиш ва бундай вазиятларда ҳаракат қилиш давлат тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида”ги қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти маълум даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор 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.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи<sup>2</sup>.** Ер ости ва ер усти қувурларининг сейсмик мустаҳкамлиги муаммоларини ҳал этиш бўйича илмий-тадқиқот ишлари жаҳоннинг қуйидаги етакчи илмий марказлар ва олий таълим муассасаларида олиб борилмоқда: American Society of Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Southwest Research Institute Report to the American Gas Association (АҚШ), Seismic Design for Gas Pipelines, Japan Gas Association (Япония), Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (Туркия), Department of Building Engineering, Tongji University, Department of Building and Construction, City University of Hong Kong (Хитой), Department of Hydraulic, Geotechnical and Environmental Engineering, Federico II University (Италия), University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy (Болгария), В.А. Кучеренко номидаги Иншоотларнинг сейсмик мустаҳкамлигини тадқиқ қилиш маркази (Россия), National Information Center of Earthquake Engineering, Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures (Ҳиндистон), Department of Civil Engineering – Isfahan University of Technology (Эрон), Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти (Ўзбекистон).

Турли юкланиш кўринишларга ва чегаравий шартларга эга ер ости қувурларининг динамик ҳисоблаш усулларини такомиллаштириш бўйича дунёда, жумладан қуйидаги илмий натижалар олинган: сейсмик кучлар

---

<sup>2</sup> Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқот шарҳи қуйидаги манбаалар асосида амалга оширилган: <https://www.asce.org/>; <https://ce.berkeley.edu/>; <http://mceer.eng.buffalo.edu/>; <http://link.springer.com/>; [www.alireza.azarbakht.info/files/papers/JP\\_2014-8.pdf](http://www.alireza.azarbakht.info/files/papers/JP_2014-8.pdf); [www.researchinventy.com/](http://www.researchinventy.com/); <http://sdgee.civil.auth.gr/>; [www.geengineeringssystem.com/](http://www.geengineeringssystem.com/); [www.preventionweb.net/](http://www.preventionweb.net/); <http://apapad.users.uth.gr/>; The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. China; The 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon ва бошқалар.

таъсирида ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини аниқлашнинг сонли ва экспериментал усуллари, грунтнинг кучли ҳаракатлари содир бўлувчи фаол ер ёриқлари, кўчки ва қуйқаланишлар, грунтнинг чизиқсиз эффектлари, геометрик ва физик нозизиқлик каби хусусиятларини инобатга олган ҳолда такомиллаштирилган (American Society of Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering University of California, АКШ; Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Туркия; City University of Hong Kong, Хитой); қувурлар сейсмодинамикасининг асосий масалалари шакллантирилган (эластик муҳит ва стерженнинг биргаликдаги ҳаракати), силжишга мойил чоклар билан бириккан қувур ва муҳитнинг биргаликда сейсмик тебранишининг динамик модели қурилган (Москва давлат университети, Россия); тўлқин векторига нисбатан нефт ўтказгич ўқининг ихтиёрий жойлашишига эга сейсмик юкламаларда грунтга кўмилган магистрал қувурнинг чизиқли қисмининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати параметрлари ва динамик ҳаракати таҳлилининг ҳисоблаш алгоритми ва дастурий-ҳисоблаш модули ишлаб чиқилган (Москва давлат техника университети, Россия); портлаш тўлқинлари таъсирида қоя грунтларида жойлашган нефт ўтказгичнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблашнинг математик модели тузилган (“Тоғ” миллий минерал-ҳомашё университети, Россия); сирт тўлқинлари тарқалганда тўғри чизиқли уланиш чокларига эга ер ости қувурининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини баҳолашнинг сонли усуллари такомиллаштирилган (Soochow University, China, Isfahan University of Technology, Iran; University of Naples Federico II, Italy); кўндаланг ва бўйлама юкламаларнинг ўрнини тўлдириш (компенсация қилиш), мураккаб тармоқли ер ости иншоотлари сейсмик мустаҳкамлигининг динамик назарияси ҳамда ер ости иншоотлари сейсмик мустаҳкамлигининг тўлқин назарияси ишлаб чиқилган (Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти, Ўзбекистон).

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Сейсмик юкланишларда ер ости қувурларининг мустаҳкамлиги бўйича илмий назарий ва экспериментал тадқиқотлар, иншоотларнинг сейсмик мустаҳкамлиги билан шуғулланувчи дунёнинг йирик олимлари M.J. O’Rourke, L.R. Wang, N. Suzuki, A. Sakurai, T.D. O’Rourke, N.M. Newmark, El. Hmadi, T. Takahashi, T. Tanaka, K. Yoshizaki, X.L. Liu, I.C. Anderson, S.B. Johnston, V. Corrado, Д.Д. Баркан, Т.Р. Рашидов, В.А. Ильичев, Я.М. Айзенберг, А.Г. Назаров, А.Б. Айнбиндер, Ш.Г. Напетваридзе, А.С. Гехман, М.Ш. Исраилов, А.А. Александров, Р.А. Гумеров, Э.Н. Фигаров ва жаҳоннинг етакчи илмий марказлари, университетлари ҳамда илмий-тадқиқот институтлари, шунингдек, бошқа кўплаб олимлар томонидан олиб борилган.

Ер ости қувурлари сейсмик мустаҳкамлиги соҳаси бўйича назарий ва амалий тадқиқотларнинг натижалари M.J. O’Rourke ва X.L. Liuning монографиясида (1999 й) батафсил таҳлил этилган. Мазкур монография жаҳоннинг турли минтақаларида сейсмодинамиканинг шаклланиши, ривожланиш босқичлари тарихини ва уларнинг натижаларини чуқур таҳлил этиш имкониятини беради.

Ер ости иншоотлари сейсмодинамикаси назарияси, Ашхобод (1948 й.) ва Тошкентда (1966 й.) бўлиб ўтган кучли zilzilалар оқибатлари ҳақидаги аниқ маълумотларга асосланиб, Ўзбекистонда ишлаб чиқилган. Ярим аср аввал, ер ости қувурлари сейсмик мустаҳкамлигининг динамик назарияси шакллана бошлаганда, zilзила таъсиридаги ер ости иншоотларининг шикастланишлари ва бузилишларига оид маълумотлар етарли бўлмаган. Фақат айрим Япония (Токио, 1923 й.), АҚШ (Калифорния, 1906 й.), Туркменистон (Ашхобод), Ўзбекистон (Тошкент) ва бошқа zilзила оқибатлари ҳақидаги маълумотлар мавжуд бўлган. Буни ўша вақтда сейсмик ҳудудларда ер ости қувурлари тизимининг кўлами нисбатан кўп бўлмаганлиги, уларнинг zilзилада шикастланишларини аниқлаш қийин бўлганлиги билан изоҳлаш мумкин.

Мамлакатимизда бир қатор олимлар томонидан ер ости қувурларининг сейсмик мустаҳкамлигини ошириш бўйича илмий-тадқиқот ишлари олиб борилган. Грунт билан ўзаро таъсирдаги иншоотларнинг динамикаси муаммолари бўйича илмий тадқиқотлар, турли математик моделлардан фойдаланиш, шунингдек қувурларнинг аниқ ҳисоблари билан боғлиқ бўлган алоҳида тадқиқотлар Я.Н. Мубараков, Г.Х. Хожметов, А.А. Ишанходжаев, Б.М. Мардонов, М. Мирсаидов, К.С. Султанов, И. Мирзаев, Т. Юлдашев, Ш. Юлдашев, Х.З. Расулов, Т. Мавлянов, Ш.М. Маматкулов, К.Д. Салямова, И. Сафаров, Б.Э. Хусанов, М.К. Усаров, Х.С. Сағдиев, А. Каюмов, А.Х. Маткаримов, В.А. Омельяненко, М. Хазраткулов, С.Ф. Проскурина, А.Ю. Юсупов, З.Р. Тешабаев, У. Раҳманов, Т.Т. Собиров, Е.Н. Колмакова ва бошқалар томонидан олиб борилган.

Амалдаги меъёрий ҳужжатда (ҚМҚ 2.01.03-96 “Зилзилавий ҳудудларда қурилиш”, “Ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқлари” IV бўлими) мураккаб шаклдаги ер ости иншоотларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблаш бўйича маълумотлар ва махсус кўрсатмалар етарлича даражада мавжуд эмас. Шу билан бир қаторда, хорижий мамлакатларда ер ости иншоотлари сейсмодинамикаси бўйича тадқиқотларнинг таҳлили мураккаб тармоқли ер ости қувурларининг ҳисоблаш усулларини етарли даражада эмаслигини кўрсатди. Шунинг учун ушбу диссертацияда мураккаб шаклдаги ер ости қувурлари тизими сейсмодинамикаси ўрганилган.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасанинг илмий-тадқиқот режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти илмий-тадқиқот ишлари режасига мувофиқ №Ф4-ФА-Ф047 “Структураси ўзгарган грунтларда жойлашган мураккаб шаклдаги ер ости қувур тизимларининг сейсмодинамикаси” (2012-2016), №ФА-А14-Ф019 “Жаҳон миқёсидаги кучли zilzilалар оқибатларини муҳандислик таҳлили ва янги тадқиқотлар асосида zilзилабардош ер ости муҳандислик иншоотларини ҳисоблаш ва лойиҳалаш усулларини янгилаш учун таклифлар ишлаб чиқиш” (2015-2017), №ФА-Ф-4-006 “Ихтиёрий йўналган сейсмик кучлар таъсиридаги текисликда ва фазовий жойлашган ер ости қувурлар тизимининг сейсмодинамикаси” (2017-2020), №MRU-FA-58/2017 “Сейсмик таъсирлардан

ҳимоялаш учун акустик тўсиқлар: концепцияси, математик моделлар ва сонли алгоритмларни ишлаб чиқиш” 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 илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** ихтиёрий йўналган сейсмик таъсирлар, шу жумладан реал зилзила ёзувлари асосида мураккаб шаклдаги ер ости фазовий қувурлар тизими сейсмодинамикаси усулларини ривожлантиришдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

сейсмик таъсирдаги (гармоник, сўнувчи гармоник, импульс) тўғри чизиқли ва мураккаб тармоқли ер ости қувурларининг бўйлама тебраниши масалаларини сонли ҳисоблаш алгоритмлари ва методикасини ишлаб чиқиш;

ихтиёрий йўналган сейсмик юкламалар таъсиридаги ер ости қувурлари тизимининг механик-математик моделини Гамильтон–Остроградский вариацион тамойили асосида ишлаб чиқиш (умумий масала);

ихтиёрий йўналган сейсмик юкламалар таъсирида уланиш чокларига эга ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини сонли ҳисоблаш методикасини ишлаб чиқиш;

ортогонал ва ноортогонал шаклдаги ер ости қувурларининг сейсмодинамикаси масалаларини ҳисоблаш методикасини ишлаб чиқиш;

реал зилзила ёзувлари асосида тугунли бирикмаларга эга ортогонал ва ноортогонал шаклдаги ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини аниқлаш усулини ишлаб чиқиш;

ер ости қувурлари сейсмодинамикасининг қаралаётган масалаларини ҳисоблаш учун шахсий компьютер дастурлари комплексини яратиш;

амалиётга татбиқ этиш учун ҳар хил сейсмик юкламалар ва реал зилзилалар ёзувлари асосида турли шаклдаги ер ости қувурлари динамикаси тадқиқотлари бўйича кўп вариантли ҳисоблаш экспериментларини ўтказиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида республика сейсмик ҳудудларида жойлашган турли шаклдаги текисликда ва фазовий жойлаштирилган ер ости қувурлари (сув, газ, нефт ўтказгич қувурлари ва бошқалар) тизими олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** турли шаклдаги ер ости фазовий қувурлар тизимининг сейсмодинамик жараёнларидир.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот олиб бориш жараёнида деформацияланувчан қаттиқ жисмлар механикаси ва қурилиш механикаси усуллари, ҳисоблаш математикаси, математик моделлаштириш, сонли усуллар, дастурлаш усуллари, ҳисоблаш экспериментлари усуллари қўлланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

сейсмик таъсирларда (гармоник, сўнувчи гармоник, импульс) тўғри чизиқли ва мураккаб тармоқли ер ости қувурларининг бўйлама тебранишлари сейсмодинамикаси масалаларини ҳисоблашнинг сонли алгоритмлари ва усуллари такомиллаштирилган;

ихтиёрий йўналган сейсмик таъсирларда фазовий тебранишдаги ер ости қувурларининг ҳамда тугун қисми абсолют қаттиқ жисм кўринишидаги

мураккаб тармоқнинг дифференциал тенгламалар системаси Гамильтон–Остроградский вариацион тамойили асосида ишлаб чиқилган;

ихтиёрий йўналган сейсмик юкламалардаги уланиш чоклари билан бириктирилган ер ости қувурлари сейсмодинамикасининг янги масалаларини ҳисоблаш услуби ишлаб чиқилган;

ортогонал ва ноортогонал шаклдаги ер ости фазовий қувурлар тизимининг сейсмодинамикаси масалаларини ечиш учун чекли айирмалар ва чекли элементлар усуллари асосида янги ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган;

илк бор реал зилзила ёзувлари асосида тугунлар билан бириктирилган ортогонал ва ноортогонал шаклдаги ер ости қувурлари сейсмодинамикаси масалаларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини аниқлаш усули ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

сейсмик таъсирлардаги ер ости қувурларининг фазовий тизимини сейсмодинамик тадқиқоти учун кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини аниқлашга асосланган дастурий мажмуа ишлаб чиқилган;

сейсмик ҳудудларда ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқларини ҚМҚ 2.01.03-96 “Зилзилавий ҳудудларда қурилиш” меъёрий қоидалари асосида ҳисоблаш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилган;

сейсмик ҳудудларда ер ости қувурини лойиҳалаш жараёнида ҳисоблаш методикасидан фойдаланиш (Наманган вилоятидаги “Ичимлик суви ва канализация тизимлари” объекти) ҳисоблаш вақтининг 2-3 марта тежалишига, иншоотнинг турғунлиги ҳамда чидамлилигини 1,2 марта захира билан ҳисобланиши таъминланди. Қурилиш майдонининг сейсмик интенсивлигини ҳисобга олган ҳолда олинган натижалар қувурларнинг кўмилиш чуқурлигини 15–20 фоизгача камайтириш имконини берган;

диссертация ишининг натижаларидан Фуқаро бинолари қуришнинг илмий тадқиқоти ва лойиҳа қидируви институти “ToshuyjoyLITI” да ҚМҚ 2.01.03-96 “Зилзилавий ҳудудларда қурилиш” меъёрий ҳужжатининг, “Ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқлари” IV бўлимини қайта ишланган вариантини тайёрлашда фойдаланилган;

тадқиқот натижалари янгиланган ҚМҚ 2.01.03-19 “Зилзилавий ҳудудларда қурилиш” меъёрий ҳужжатининг “Ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқлари” IV бўлимига киритилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.** Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги аниқ математик усуллар, замонавий услуб ва воситалардан фойдаланилган ҳолда олинган натижаларни қўллаш, аввалги олинган натижалар билан солиштирилганлиги, шунингдек, назарий тадқиқотлар асосида олинган натижалар реал маълумотлар билан таққослаш ҳамда амалиётга жорий қилинганлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти турли шаклдаги фазовий ер ости қувурлари тизими сейсмодинамикаси жараёнларининг математик модели ва уларни сонли ҳисоблаш услублари ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти фазовий ер ости қувурлари тизими сейсмодинамикасини ҳисоблашга асосланган услуб асосида тузилган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминотлар мажмуи, ер ости қувурлари сейсмодинамикасини ҳисоблашнинг ягона концепциясини ўзида акс эттириши, шунингдек сейсмик ҳудудларда ер ости (сув таъминоти, газ таъминоти, нефт таъминоти ва бошқалар) қувурларини лойиҳалаш ва қуриш жараёнларининг тезлашишига, бажарилган иш сифатининг ортишига, ҳаётни таъминловчи мураккаб тизимларни мукамал, турғун ишлашига ҳамда сейсмик хавф-хатарни сезиларли даражада камайтиришга хизмат қилиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Ер ости фазовий қувурлар тизими сейсмодинамикаси жараёнларининг тадқиқоти бўйича олинган илмий натижалар асосида:

сейсмик ҳудудларда ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқларини ҚМҚ 2.01.03-96 “Зилзилавий ҳудудларда қурилиш” меъёрий қоидалари асосида ишлаб чиқилган ҳисоблаш дастури Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг «ToshuyjoyLITI», «O’ZBEKKOMMUNAL-LOYIHAQURILISH» ва «QISHLOQQURILISHLOYIHA» ташкилотлари томонидан лойиҳаланаётган объектларни ҳисоблашда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг 2020 йил 19 августдаги 09-06-6406 – сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш орқали ресурс тежамкорликка, иш сифати ортишига ва лойиҳалаш жараёнидаги ҳисоблаш вақтини 2-3 марта тежаш имконини берган;

сейсмик юкламаларда ер ости фазовий қувурлар тизимининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини аниқлашнинг такомиллаштирилган усули амалиётда ҳисоблашга татбиқ этилган ва ҚМҚ 2.01.03-96 “Зилзилавий ҳудудларда қурилиш” меъёрий ҳужжатининг, “Ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқлари” IV бўлимини қайта ишлашда “ToshuyjoyLITI” АЖ томонидан фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг 2020 йил 19 августдаги 09-06-6406 – сонли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши ер ости қувурларининг зарарланишларини ва бузилишларини олдини олади ҳамда иқтисодий жиҳатдан муҳим аҳамиятга эга бўлган фавқулодда ҳолатларда авария, қурилиш-монтаж ишларига сарфланадиган сарф-ҳаражатларни тежаш имконини беради;

ер ости қувурларининг қудуқларини сейсмик мустаҳкамликка таъсирини аниқлаш ва қудуқлар билан бириктирилган қувурларни кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини баҳолаш услуги ҚМҚ 2.01.03-96 “Зилзилавий ҳудудларда қурилиш” меъёрий ҳужжатининг IV “Ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқлари” бўлимини қайта ишлашда фойдаланилган, ўзгартириш ва қўшимчалар билан Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигига амалиётда қўллаш учун тақдим этилди (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг 2020 йил 19 августдаги 09-06-6406 – сонли маълумотномаси). Илмий натижаларни қўлланилиши ер ости иншоотларини зилзилабардошлигини ошириш ва бўлиши мумкин бўлган кучли зилзилалар оқибатини камайтириш имконини беради;

ихтиёрий йўналган сейсмик юкланишлардаги ер ости фазовий қувурлари тизимининг сейсмик мустаҳкамлигини ҳисоблаш услуби яратилди, Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлиги тармоғидаги “KELAJAK-S” ХК да ер ости қувурларини ҳисоблаш ва лойиҳалаш жараёнига татбиқ этилди (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг 2020 йил 19 августдаги 09-06-6406 – сонли маълумотномаси). Тадқиқот натижаларини қўлланилиши лойиҳалаш жараёнидаги ҳисоблаш вақтини 2–3 марта тежалишига, объектнинг турғунлиги ҳамда чидамлилигини 1,2 марта захира билан ҳисобланишига эришилган. Қурилиш майдонининг сейсмик интенсивлигини ҳисобга олган ҳолда олинган натижалар қувурларнинг кўмилиш чуқурлигини 15–20 фоизгача камайтириш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари 8 та илмий-амалий анжуманларда муҳокама қилинган, шу жумладан 6 та халқаро ва 2 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 35 та илмий ишлар чоп этилган, шулардан 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациясининг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 17 та мақола, жумладан 12 та мақола республика ва 5 та мақола хорижий журналларда нашр этилган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби, кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва 5 та иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 197 бетни ташкил этган.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг кириш қисмида диссертация мавзусининг 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 очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Ер ости қувурлари сейсmodинамикаси амалий масалаларининг ўрганилганлик ҳолати”** деб номлаган биринчи бобида, ер ости қувурлари сейсmodинамикаси амалий масалаларини ўрганиш тадқиқотлари ва замонавий ҳолатдаги илмий муаммоларнинг аналитик шарҳлари келтирилган. Сейсмик таъсирлардаги тўғри чизикли ва мураккаб тармоқли ер ости қувурларининг бўйлама тебраниши тўғрисидаги анъанавий масалалар қаралган. Сейсмик таъсирларда ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати масалаларини компьютерда амалга ошириш ва ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган.

1960-1980 йилларда турли шароитларда грунт билан ер ости қувурларининг элементларидаги ўзаро таъсирни ўрганиш бўйича қатор лаборатория ва табиий экспериментал тадқиқотлар ўтказилган. Бўйлама ва кўндаланг кучлар, эгувчи ва буровчи моментларнинг статик таъсир параметрларини аниқлаш учун экспериментал ускуналар ясалган. Экспериментларни ўтказиш методикаси ёритилган.

Шу билан бирга бугунги кунда бир қатор долзарб масалалар мавжуд. Маълумки, ҳаётни таъминловчи қувур тизимлари ўзаро ортогонал ва ноортогонал бириктирилган бир нечта қувурлар ҳамда тугунларга бириктирилган тўғри чизиқли қувурлардан иборат. Бу ҳолатда сейсмик тўлқиннинг йўналиши бундай қувурлар тизимига фазода ихтиёрий бурчак остида таъсир қилади. Ихтиёрий бурчак остида йўналган сейсмик таъсирларда, фазода ихтиёрий жойлаштирилган қувурларнинг ер ости тизими учун кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблашнинг янги математик моделларини ишлаб чиқиш зарур.

Ҳозирги вақтда юртимиз ва хорижда содир бўлган кучли зилзилалар шуни кўрсатадики, зилзилалардан келиб чиқадиган хавфни олдиндан баҳолаш ва тегишли чораларни ўз вақтида кўриб чиқиш (сейсмик рискни баҳолаш муаммолари ва уларни камайтириш) ҳалокатли ҳодисаларни камайтириш учун катта аҳамиятга эга. Реал зилзилаларнинг ёзувлари (сейсмограмма ва акселерограмма) таъсирида ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ва барқарорлигини аниқлаш учун ҳисоблашнинг янги математик моделларини, алгоритмларини ва амалий дастурларини ишлаб чиқиш талаб этилади.

Диссертациянинг **“Фазовий сейсмик таъсирлардаги ер ости қувурлари тизими динамикасини математик моделлаштириш”** деб номланган иккинчи бобида Гамильтон–Остроградский вариацион тамойили асосида ихтиёрий йўналган сейсмик юкланишдаги ер ости қувурлари сейсмодинамикасининг замонавий янги масалалари қаралган. Дифференциал тенгламалар системаси мос чегаравий ва бошланғич шартлар билан бирга келтириб чиқарилган. Ихтиёрий йўналган сейсмик юкланишдаги ер ости қувурлари чегаравий масалаларини ҳисоблашнинг компьютерда амалга ошириш методикаси ишлаб чиқилди. Атрофдаги грунт билан ўзаро таъсирда бўлган абсолют қаттиқ жисм кўринишидаги мураккаб тугуннинг дифференциал тенгламалар тизими келтириб чиқарилган.

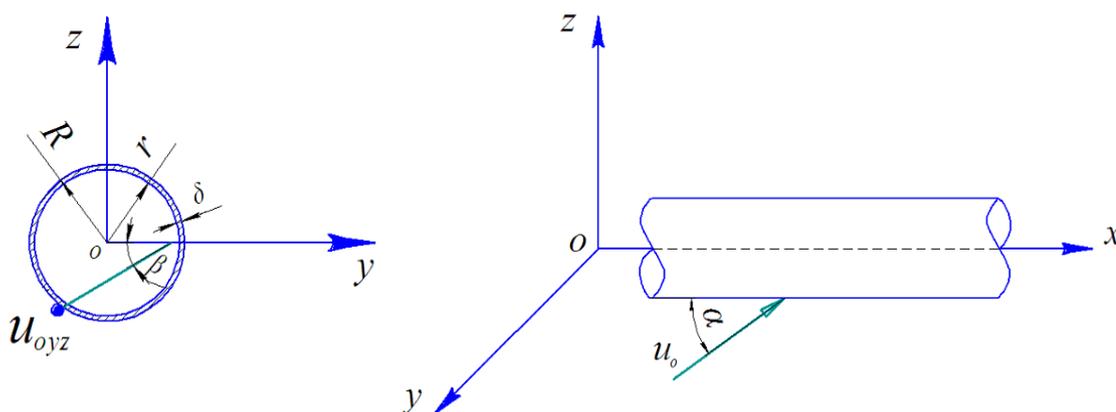
**Ер ости қувурлари учун Гамильтон–Остроградский вариацион тамойили.** Кучли зилзилаларнинг оқибатлари таҳлили шуни кўрсатадики, ер ости иншоотларининг сейсмик мустаҳкамлиги сейсмик тўлқиннинг таъсир этиш йўналишига боғлиқ. Зилзилаларда ер ости иншоотларига юкланишлар ихтиёрий йўналишда таъсир этади, шунинг учун фазовий тебранишларда ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини баҳолаш, мумкин бўлган сейсмик хавфни олдиндан аниқлаш долзарб масалалардан ҳисобланади.

Ихтиёрий йўналган сейсмик юкланишлардаги ер ости қувурларининг бўйлама, кўндаланг тебранишларини ўрганиш учун стерженларнинг тебраниши амалий назарияси қўлланилган.

Ер ости қувурлари учун Гамильтон–Остроградский вариацион тамойили қуйидаги кўринишга эга

$$\int_t (\delta T - \delta \Pi + \delta A) dt = 0, \quad (1)$$

бунда  $\delta T$ ,  $\delta \Pi$ –кинетик ва потенциал энергия вариацияси;  $\delta A$ –ташқи кучнинг бажарган иши вариацияси;  $t$ –вақт.



**1-расм. Ихтиёрий йўналган сейсмик юкланишдаги ер ости қувурининг схемаси**

Чекланишлар асосида қувур стержен кўринишида (1-расм) моделлаштирилади, кўчишлар қуйидаги кўринишда ифодаланган:

$$u_1 = u - y\alpha_1 - z\alpha_2, \quad u_2 = v + z\theta, \quad u_3 = w - y\theta, \quad (2)$$

бунда  $u_1, u_2, u_3$ –компонентлар қувурнинг ҳар қандай нуқтасининг кўчиши;  $u, v, w$ –қувур ўқининг бўйлама, кўндаланг кўчишлари;  $\alpha_1, \alpha_2$ –соф эгилишдаги қувурнинг эгилиш бурчаги;  $\theta$ –қувур ўқининг буралиши бурчаги.

Қувурнинг деформацияси эластик ораликда қабул қилинган. Шунга асосан қувур материали учун Гук қонуни қуйидагича

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11}, \quad \sigma_{12} = G\varepsilon_{12}, \quad \sigma_{13} = G\varepsilon_{13}, \quad (3)$$

бунда  $\varepsilon_{ij}$ –учун Коши муносабатлари қуйидаги кўринишда бўлади

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} - y \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} - z \frac{\partial \alpha_2}{\partial x}, \quad \varepsilon_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} + z \frac{\partial \theta}{\partial x} - \alpha_1, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{13} = \frac{\partial u_3}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} - y \frac{\partial \theta}{\partial x} - \alpha_2.$$

Кувурнинг кинетик энергияси вариацияси:

$$\int_t \delta \Gamma dt = \int \int_V \left[ \rho \frac{\partial u_1}{\partial t} \delta \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_2}{\partial t} \delta \frac{\partial u_2}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_3}{\partial t} \delta \frac{\partial u_3}{\partial t} \right] dV dt. \quad (5)$$

Кувурнинг потенциал энергияси вариацияси:

$$\int_t \delta \Pi dt = \int \int_V (\sigma_{11} \delta \varepsilon_{11} + \sigma_{12} \delta \varepsilon_{12} + \sigma_{13} \delta \varepsilon_{13}) dV dt. \quad (6)$$

Кувурнинг ташқи кучлари иши вариацияси:

$$\begin{aligned} \int_t \delta A dt = & \int \int_V [P_1 \delta u_1 + P_2 \delta u_2 + P_3 \delta u_3] dV dt + \int \int_S [q_1 \delta u_1 + \\ & + q_2 \delta u_2 + q_3 \delta u_3] dS dt + \int \int_{S_1} [\varphi_1 \delta u_1 + \varphi_2 \delta u_2 + \varphi_3 \delta u_3] dS_1 dt \Big|_x, \end{aligned} \quad (7)$$

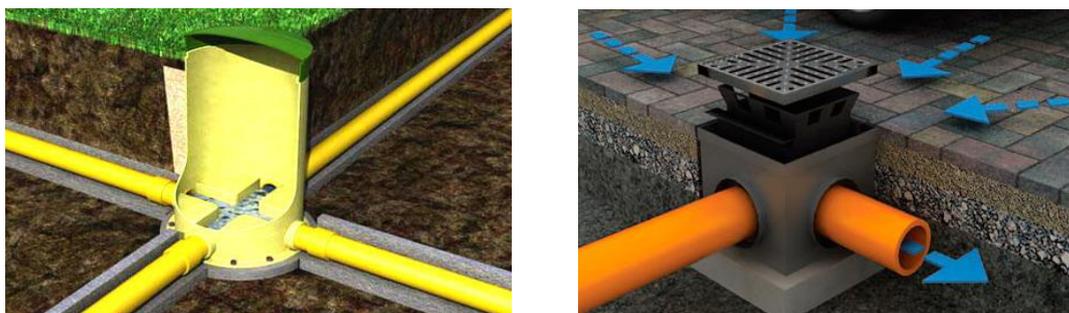
бунда  $P_1, P_2, P_3$ —ҳажмий кучлар;  $q_1, q_2, q_3$ —сирт кучлари,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ —чегарадаги кучлар.

Кувурнинг кинетик (5), потенциал (6) энергиялари ва ташқи кучлари иши (7) вариациялари ифодаларини Гамильтон-Остроградский (1) вариацион тамойилига қўямиз, мос бошланғич ва чегаравий шартларга эга қўйидаги вариацион тенгламалар тизимини келтириб чиқарамиз:

$$\begin{aligned} \int_t (\delta \Gamma - \delta \Pi + \delta A) dt = & \int_x \left[ \rho F \frac{\partial u}{\partial t} \delta u + \rho I_z \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} \delta \alpha_1 + \rho I_y \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} \delta \alpha_2 + \rho F \frac{\partial v}{\partial t} \delta v + \right. \\ & + \rho F \frac{\partial w}{\partial t} \delta w + \rho I_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \delta \theta \Big] dx \Big|_t + \int \int_x \left\{ \left[ -\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + N_x(P_1) + N_x(q_1) \right] \delta u + \right. \\ & + \left[ -\rho I_z \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + EI_z \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial x^2} + GF \frac{\partial v}{\partial x} - GF \alpha_1 - (M_z(P_1) + M_z(q_1)) \right] \delta \alpha_1 + \left[ -\rho I_y \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} + \right. \\ & + EI_y \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial x^2} + GF \frac{\partial w}{\partial x} - GF \alpha_2 - (M_y(P_1) + M_y(q_1)) \Big] \delta \alpha_2 + \left[ -\rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + GF \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \right. \\ & - GF \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} + (Q_{12}(P_2) + Q_{12}(q_2)) \Big] \delta v + \left[ -\rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + GF \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - GF \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} + Q_{13}(P_3) + \right. \\ & + Q_{13}(q_3) \Big] \delta w + \left[ -\rho I_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + GI_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + (M_x(P_2, P_3) + M_x(q_2, q_3)) \right] \delta \theta \Big\} dx dt + \\ & + \left\{ \left[ \left( -EF \frac{\partial u}{\partial x} + N_x(\varphi_1) \right) \delta u + \left( -EI_z \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} - M_z(\varphi_1) \right) \delta \alpha_1 + \left( -EI_y \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} - M_y(\varphi_1) \right) \delta \alpha_2 + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left( -GF \frac{\partial v}{\partial x} + GF \alpha_1 + Q_{12}(\varphi_2) \right) \delta v + \left( -GF \frac{\partial w}{\partial x} + GF \alpha_2 + Q_{13}(\varphi_3) \right) \delta w + \\
& + \left( -GI_p \frac{\partial \theta}{\partial x} + M_x(\varphi_2, \varphi_3) \right) \delta \theta \Bigg|_x \Bigg] dt = 0.
\end{aligned}$$

**Абсолют қаттиқ жисм кўринишидаги мураккаб тугуннинг дифференциал тенгламалар тизими.** Мураккаб тугунни фазовий координаталар ( $Oxyz$ ) тизимида кўриб чиқамиз. Власов – Джанелидзе – Кабулов гипотезаси ва вариацион тамойили асосида мураккаб тармоқли ер ости қувурлари абсолют қаттиқ тугунининг математик модели шакллантирилди.



**2-расм. Фазовий мураккаб тармоқли тугуннинг схемаси**

Мураккаб тугуннинг кўриниши 2-расмда кўрсатилган. Мураккаб тугуннинг кўчишларини қўйидаги шаклда қабул қиламиз:

$$u_1 = u^0 - y\alpha_1^0 - z\alpha_2^0, \quad u_2 = v^0 + z\theta^0, \quad u_3 = w^0 - y\theta^0, \quad (8)$$

бунда  $u_1, u_2, u_3$  – тугун нуктасининг кўчиши;  $u^0$  – тугуннинг бўйлама кўчиши;  $v^0, w^0$  – тугуннинг кўндаланг кўчишлари;  $\alpha_1^0, \alpha_2^0$  – тугун кесимининг эгилиш бурчаги;  $\theta^0$  – тугун буралиш бурчаги.

Кинетик энергиянинг вариацияси. Бунда абсолют қаттиқ жисм кўринишидаги мураккаб тугуннинг кинетик энергиясининг вариацияси қўйидаги кўринишда бўлади:

$$\int_t \delta \Gamma dt = \int_t \int_V \left[ \rho \frac{\partial u_1}{\partial t} \delta \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_2}{\partial t} \delta \frac{\partial u_2}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_3}{\partial t} \delta \frac{\partial u_3}{\partial t} \right] dV dt. \quad (9)$$

Мураккаб абсолют қаттиқ тугунга таъсир этувчи ташқи кучлар ишининг вариацияси

$$\begin{aligned}
\int_t \delta A dt &= \int_t \int_V [P_1 \delta u_1 + P_2 \delta u_2 + P_3 \delta u_3] dV dt + \int_t \int_S [q_1 \delta u_1 + q_2 \delta u_2 + q_3 \delta u_3] dS dt = \\
&= \int_t \int_V [P_1 \delta (u^0 - y\alpha_1^0 - z\alpha_2^0) + P_2 \delta (v^0 + z\theta^0) + P_3 \delta (w^0 - y\theta^0)] dV dt + \\
&+ \int_t \int_S [q_1 \delta u_1 + q_2 \delta u_2 + q_3 \delta u_3] dS dt.
\end{aligned} \quad (10)$$

Ифодаларни кўриб чиқамиз

$$\int_t (\delta\Gamma + \delta A) dt = 0. \quad (11)$$

Тугуннинг кинетик энергияси (9) ва ташқи кучлари иши (10) вариациялари ифодаларини (11) га қўямиз, мос бошланғич шартларга эга қўйидаги вариацион тенгламалар тизимини келтириб чиқарамиз:

$$\begin{aligned} \int_t (\delta\Gamma + \delta A) dt = & \int_t \left\{ \left[ -M(\rho) \frac{\partial^2 u^0}{\partial t^2} + S_z(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_1^0}{\partial t^2} + S_y(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_2^0}{\partial t^2} + P_1 + q_1 \right] \delta u^0 + \right. \\ & + \left[ -M(\rho) \frac{\partial^2 v^0}{\partial t^2} - S_y(\rho) \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial t^2} + P_2 + q_2 \right] \delta v^0 + \left[ -M(\rho) \frac{\partial^2 w^0}{\partial t^2} + S_z(\rho) \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial t^2} + \right. \\ & + P_3 + q_3 \left. \right] \delta w^0 + \left[ S_z(\rho) \frac{\partial^2 u^0}{\partial t^2} - I_z(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_1^0}{\partial t^2} - I_{yz}(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_2^0}{\partial t^2} - M_z(P_1) - \right. \\ & - M_z(q_1) \left. \right] \delta \alpha_1^0 + \left[ S_y(\rho) \frac{\partial^2 u^0}{\partial t^2} - I_{yz}(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_1^0}{\partial t^2} - I_y(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_2^0}{\partial t^2} - M_y(P_1) - \right. \\ & - M_y(q_1) \left. \right] \delta \alpha_2^0 + \left[ -S_y(\rho) \frac{\partial^2 v^0}{\partial t^2} + S_z(\rho) \frac{\partial^2 w^0}{\partial t^2} - I_p(\rho) \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial t^2} + M(P_2, P_3) + \right. \\ & + M(q_2, q_3) \left. \right] \delta \theta^0 \left. \right\} dt + \left\{ \left[ M(\rho) \frac{\partial u^0}{\partial t} - S_z(\rho) \frac{\partial \alpha_1^0}{\partial t} - S_y(\rho) \frac{\partial \alpha_2^0}{\partial t} \right] \delta u^0 + \right. \\ & + \left[ M(\rho) \frac{\partial v^0}{\partial t} + S_y(\rho) \frac{\partial \theta^0}{\partial t} \right] \delta v^0 + \left[ M(\rho) \frac{\partial w^0}{\partial t} - S_z(\rho) \frac{\partial \theta^0}{\partial t} \right] \delta w^0 + \\ & + \left[ -S_z(\rho) \frac{\partial u^0}{\partial t} + I_z(\rho) \frac{\partial \alpha_1^0}{\partial t} + I_{yz}(\rho) \frac{\partial \alpha_2^0}{\partial t} \right] \delta \alpha_1^0 + \left[ -S_y(\rho) \frac{\partial u^0}{\partial t} + I_{yz}(\rho) \frac{\partial \alpha_1^0}{\partial t} + \right. \\ & + I_y(\rho) \frac{\partial \alpha_2^0}{\partial t} \left. \right] \delta \alpha_2^0 + \left[ S_y(\rho) \frac{\partial v^0}{\partial t} - S_z(\rho) \frac{\partial w^0}{\partial t} + I_p(\rho) \frac{\partial \theta^0}{\partial t} \right] \delta \theta^0 \left. \right\} \Big|_t = 0. \end{aligned}$$

Кўйилган масалаларни ҳисоблашда сонли усуллар сифатида фазовий координаталар бўйича чекли элементлар усули (ЧЭУ) ва вақт бўйича чекли айирмалар усулининг (ЧАУ) ошқормас схемасидан фойдаланамиз.

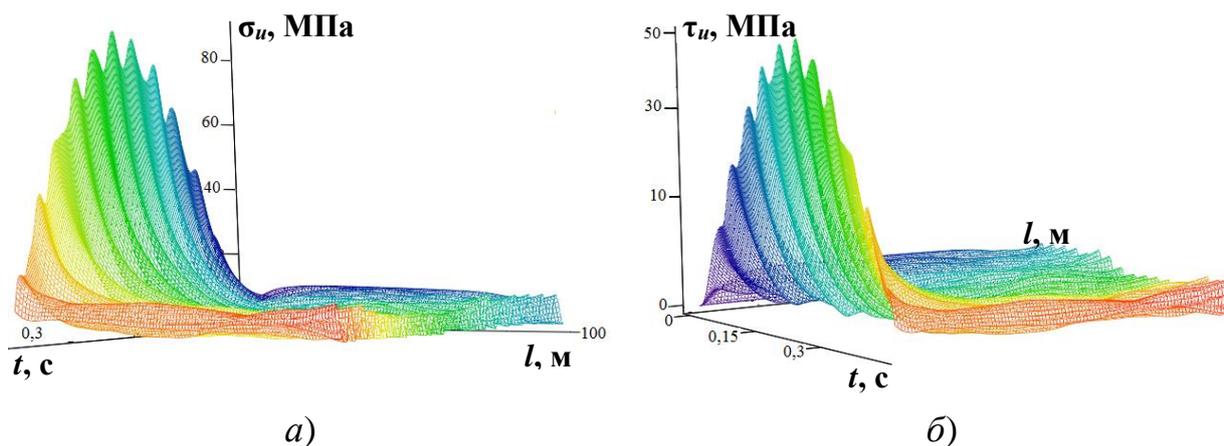
Диссертациянинг **“Фазовий сейсмик таъсирларда текис ва фазовий жойлаштирилган тўғри чизиқли ер ости қувурлари натижаларининг таҳлили”** деб номланган учинчи бобида турли хил чегаравий шартларга эга бўлган текисликда ва фазовий жойлаштирилган ер ости қувурларининг сонли тадқиқотлари ўтказилган. Фазовий сейсмик таъсирлар остидаги уланиш чокларига эга ер ости қувурларининг реакцияси аниқланди. Бириктирилган қувурларга сейсмик тўлқин таъсири, унинг бўйлама ўқига нисбатан бурчак

остида бўлганда қувурнинг ҳар бир таркибий қисми ва унинг ҳар бир уланиш чокини ҳисобга олинувчи модел бўйича ҳисоблашлар олиб бориш зарурлиги кўрсатилди.

**1-масала.** Мисол сифатида қуйидаги масалани фазовий ҳисоблаш схемаси бўйича қараймиз: ер ости қувурининг чап чегараси қотириб маҳкамланган ўнг чегараси эркин танланган.

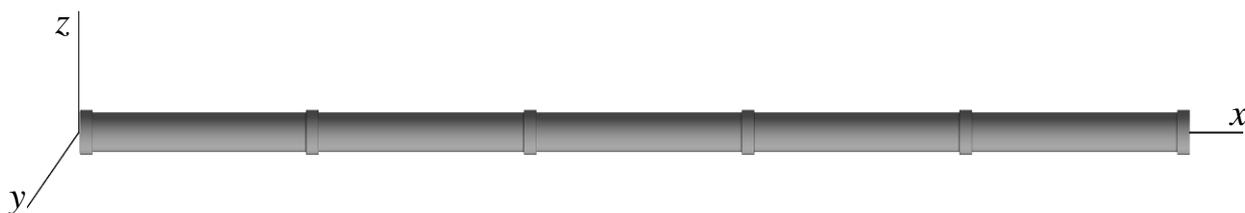
Механик и геометрик параметрларни қуйидаги кўринишда танлаймиз:  $E=2 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho=7.8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $l=100$  м;  $D_H=0.5$  м;  $D_B=0.49$  м;  $\mu_{\text{грунт}}=0.2$ ;  $\mu_{\text{труба}}=0.3$ ;  $k_x=1.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=3.9 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $u_{0x}=u_0 \cdot \cos \alpha$ ;  $u_{0y}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$ ;  $u_{0z}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$ ;  $u_0=a_0 \cdot e^{-\varepsilon(t-f(x,y,z)/C_p)} \cdot \sin \omega(t-f(x,y,z)/C_p) \cdot H(t-f(x,y,z)/C_p)$ ;  $a_0=0.004$  м;  $\varepsilon=0,3$  с<sup>-1</sup>;  $f(x,y,z) = \sqrt{(x \cdot \sin \alpha)^2 + (y \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (z \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta)^2}$ ;  $\omega=2\pi/T$ ;  $T=0.3$  с;  $C_p=1500$  м/с;  $\alpha=30^\circ$ ;  $\beta=60^\circ$ ;  $R_H=0.25$  м;  $\tilde{\gamma}=45^\circ$ .  $\alpha, \beta$  – сейсмик тўлқиннинг таъсир этиш бурчаги.

Қувурнинг узунлиги ва вақт бўйича ўзгарувчи нормал (*a*) ва уринма (*b*) интенсив кучланишларининг уч ўлчовли натижалари 3-расмда келтирилган. Расмлардан кўринадики, максимал кучланишлар қувурнинг қотириб маҳкамланган қисми атрофида пайдо бўлади.



**3-расм. Қувур узунлиги ҳамда вақт бўйича нормал (*a*) ва уринма (*b*) интенсив кучланишларининг ўзгариши**

Оху текислигида жойлашган ва атрофидаги грунт билан ўзаро таъсирдаги, кўплаб уланиш чокларига эга узун қувурни содалаштирилган эластик модел бўйича кўриб чиқамиз. Ер ости қувурининг узунлиги 200 м, унинг ҳар бир қисмининг узунлиги эса 5 м ни ташкил қилсин (4-расм).



**4-расм. Уланиш чоклари билан бириктирилган ер ости қувури**

Хусусан, қувурнинг чап ва ўнг учлари грунтга маҳкамланган, сейсмик тўлқиннинг таъсир бурчаклари  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$  бўлган гармоник функция кўринишида берилган.

Экспериментал натижаларга асосланган уланиш чоклари орасидаги кучлар, моментлар ва нисбий кўчишлар, бурилишларнинг боғлиқликлари қуйидаги кўринишда ёзилган

$$\begin{cases} N = K_N u, Q_1 = K_Q v, Q_2 = K_Q w, \\ M_{u_1} = K_{M_u} \alpha_1, M_{u_2} = K_{M_u} \alpha_2, M_k = K_{M_k} \theta, \end{cases} \quad (12)$$

бунда  $N$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $M_{u_1}$ ,  $M_{u_2}$ ,  $M_k$  – бўйлама ва кўндаланг кучлар, эгилиш ва буралиш моментлари, мос равишда  $u$ ,  $v$ ,  $w$  уланиш чокидаги нисбий эластик кўчишлар ва  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\theta$  нисбий эластик эгилишлар ҳамда буралиш бурчаклари,  $K_N$ ,  $K_Q$ ,  $K_{M_u}$ ,  $K_{M_k}$  – тегишли юкламалардаги уланиш чокнинг бикрлик коэффициентлари.

Қувурдаги кўп сонли уланиш чоклари билан бириктирилган, силжишга мойил уланиш чокларини инобатга олган бўйлама келтирилган бикрлик  $B_{np}$ , таникли олимлар томонидан қувурнинг статик деформациясига мос келадиган қуйидаги тақрибий формула кўринишида тақдим қилинган:

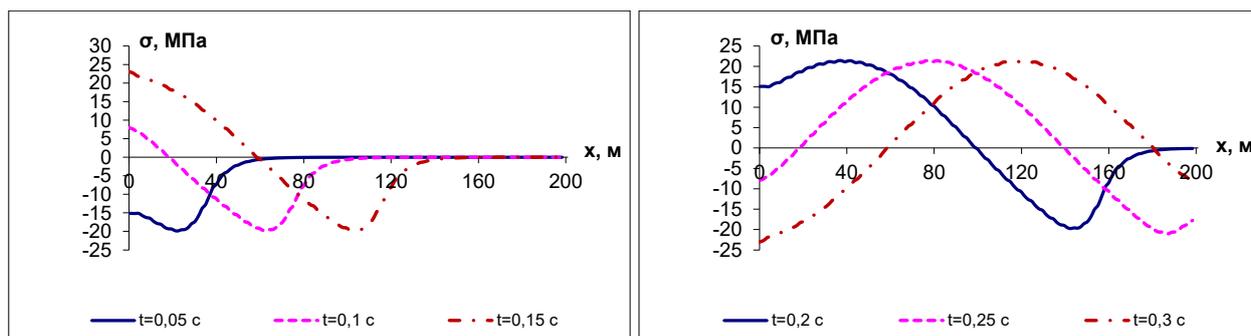
$$B_{np} = \frac{B}{1 + \frac{B}{K_N l_i}}, \quad (13)$$

бунда  $B = EF$  – чўзилишдаги (сиқилишдаги) бикрлик;  $l_i$  – битта оралик узунлиги;  $K_N$  – уланиш чокларининг бўйлама бикрлиги.

**2-масала.**  $E=1.2 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho=7.0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $l=200$  м; тўғри чизиqli қисмида  $k_x=1.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=3.9 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $u_{0x}=u_0 \cdot \cos \alpha$ ;  $u_{0y}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$ ;  $u_{0z}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$ ;  $u_0=a_0 \cdot \sin \omega(t-f(x,y,z)/C_p) \cdot H(t-f(x,y,z)/C_p)$ ;  $a_0=0.01$  м;  $\omega=2\pi/T$ ;  $f(x,y,z) = \sqrt{(x \cdot \sin \alpha)^2 + (y \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (z \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta)^2}$ ;  $T=0.3$  с;  $C_p=700$  м/с;  $\mu_{\text{грунт}}=0.2$ ;  $\mu_{\text{труба}}=0.3$ ;  $D_H=0.5$  м;  $D_B=0.49$  м. Грунтнинг тебраниш амплитудаси  $a_0$  MSK-64 шкаласи бўйича 9-балли зилзилага мос келади. Уланиш чокларининг бикрлик коэффициентлари  $K_N=80 \cdot 10^4$  кН/м;  $K_Q=200 \cdot 10^4$  кН/м;  $K_{M_u}=9 \cdot 10^2$  кНм;  $K_{M_k}=8 \cdot 10^4$  кНм.

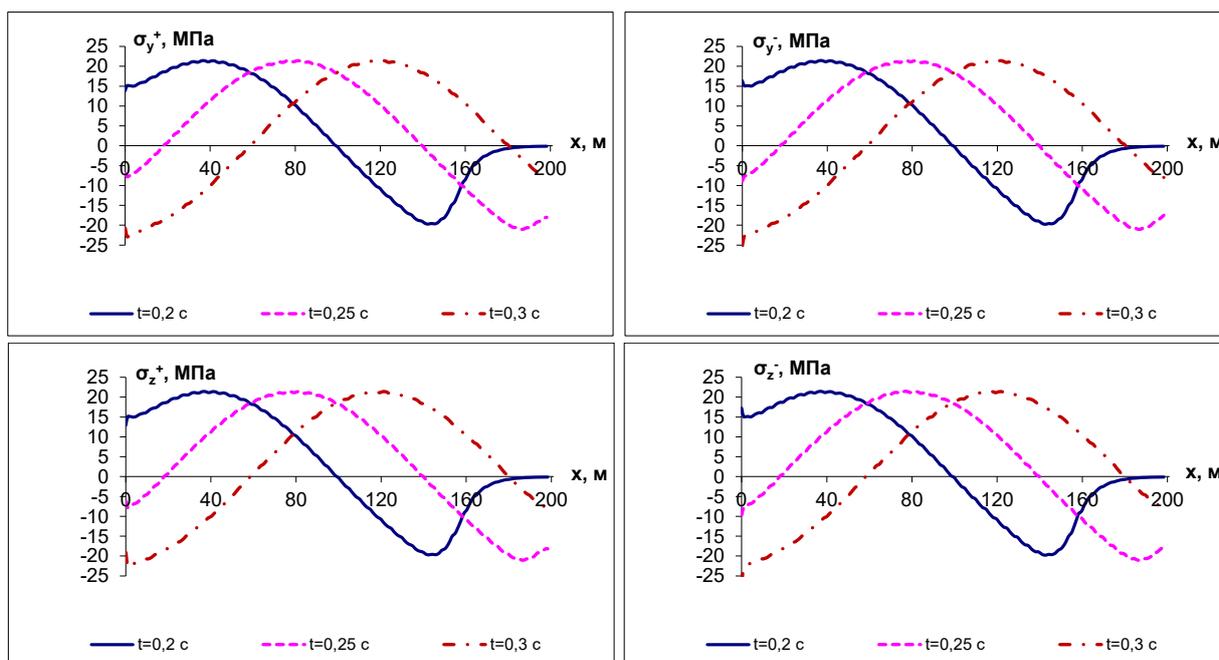
Ер ости қувурининг узунлик бўйича сиқилишдаги (чўзилишдаги) кучланишларининг қийматларини белгиланган вақт қийматидаги ўзгариши 5-расмда келтирилган

Олинган натижалардан кўринадики, ҳар бир уланиш чокида ер ости қувурининг координата бўйича сиқувчи (чўзувчи) кучланиши ушбу уланиш чокининг маълум бир кичик сакрашлар билан характерли хусусиятига эга. Бу тўлқиннинг уланиш чокидан қайтиши ва тўлқиннинг уланиш чоки орқали қувурнинг қўшни қисмига ўтиши билан боғлиқ.



**5-расм. Белгиланган вақтларда ер ости қувурининг узунлик бўйича сиқилишдаги (чўзилишдаги) кучланишлари қийматларининг ўзгариши**

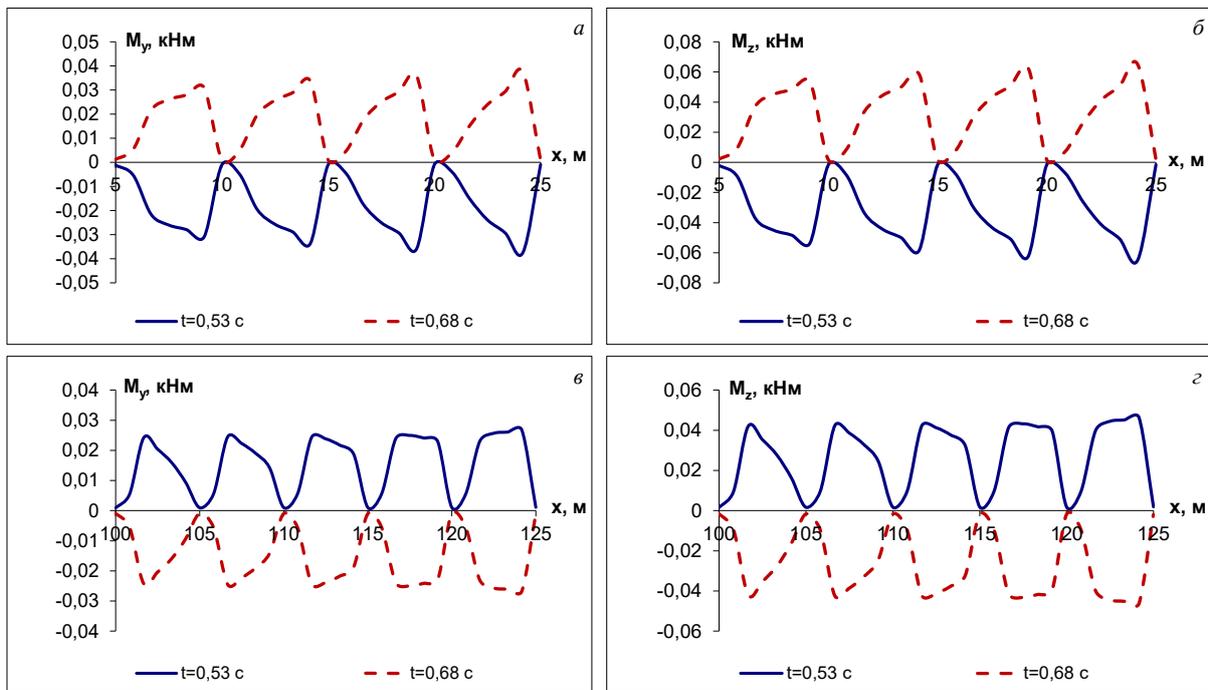
Вақтнинг белгиланган қийматларида ер ости қувурининг узунлик бўйича тўлиқ кучланишлари қийматларининг ўзгариши 6-расмда кўрсатилган. Ушбу графикалар (6-расм) шуни кўрсатадики, ер ости қувурининг ҳар бир қисми эгилиш моментларининг қийматига таъсир кўрсатади.



**6-расм. Белгиланган вақтларда ер ости қувурининг узунлик бўйича тўлиқ кучланишлари ( $\sigma_y^+$ ,  $\sigma_y^-$ ,  $\sigma_z^+$ ,  $\sigma_z^-$ ) қийматларининг ўзгариши**

Бу ерда ҳам кўриш мумкинки, ҳар бир бўғинда координата бўйича ер ости қувурининг майда сакрашлар билан тўлиқ кучланишининг қийматлари, уланиш чокларини силжишга мойиллиги ҳисобига турли характерга эга.

Яққол кўриниши учун вақтнинг белгиланган қийматларида ер ости қувурининг турли узунликлар ( $x=5-25$  м,  $x=100-125$  м и  $x=170-195$  м) оралиғида эгилиш моментлари ( $M_y$ ,  $M_z$ ) қийматларининг ўзгариши 7-расмда кўрсатилган.



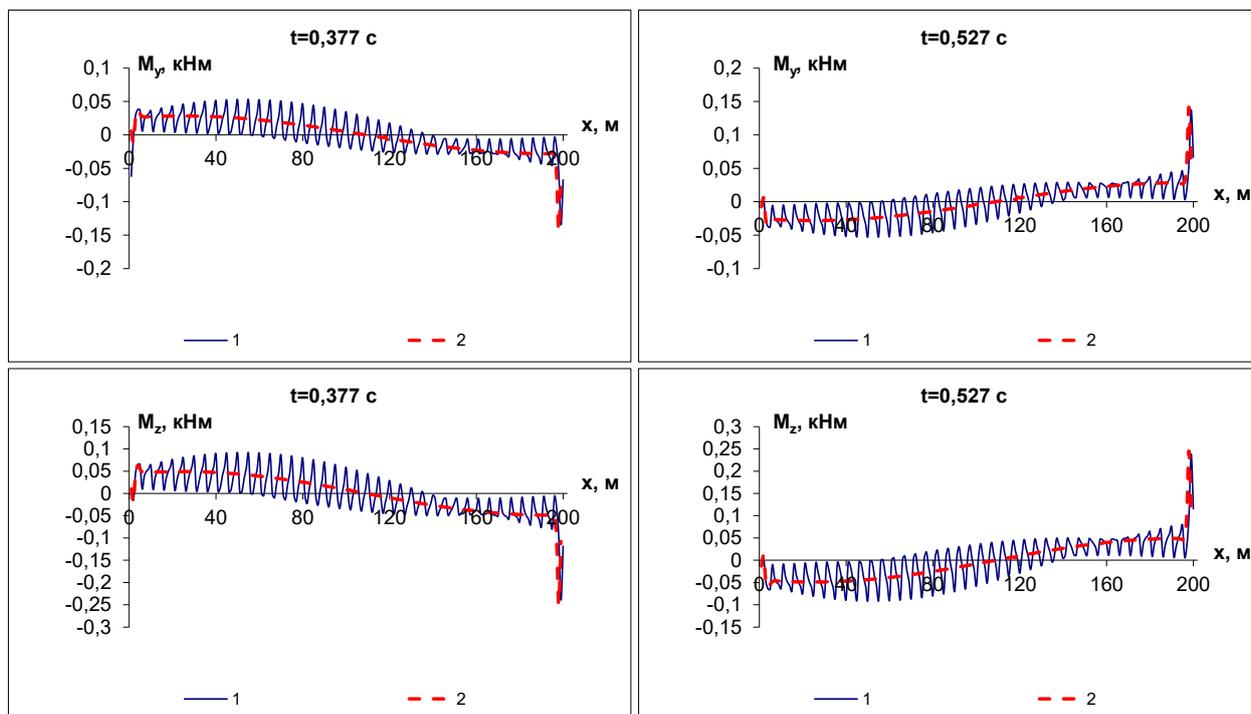
**7-расм. Белгиланган вақтда ер ости қувурининг турли кесимларидаги эгилиш моментлари ( $Oy$  ва  $Oz$  ўқларига нисбатан эгилиш) қийматларининг ўзгариши**

Графикдан кўринадики, ер ости қувури бўғимининг узунлиги бўйича эгувчи моментлар ( $M_y$ ,  $M_z$ ) ўзгариб боради – чап уланиш чокидан бошлаб катталашади, сўнг ўнг уланиш чокигача камаяди (7-расм), уланиш чокида эса эгилиш моментининг қийматлари оралиқнинг ўртасига қараганда камроқдир.

Уланиш чоклари ер ости қувурининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатининг шаклланишида муҳим рол ўйнайди, чунки ер ости қувурининг ҳар бир оралиқ бўғимида тўлиқ кучланишлар ўзгаради, бу оралиқ бўғимлардаги эгилиш деформациялари билан боғлиқ.

Иккита солиштирма моделлар бўйича ҳисоблаб чиқилган эгувчи моментларни таққослаш графиклари 8-расмда келтирилган. Кутилганидек, келтирилган бикрликка эга бир жинсли қувур модели бўйича ҳисоблаб чиқилган қувурларнинг узунлиги бўйича моментлар графиклари силлиқ кўринишга эга.

Келтирилган бикрликка ўтмасдан ҳисобланган моментлар графиги мураккаб характерга эга, бу қувурларнинг оралиқ бўғин бирикишидаги ва уларнинг уланиш чоклари элементларидаги динамик жараёнларга боғлиқдир. Ушбу солиштиришлардан хулоса қилинадики, сейсмик тўлқин уланиш чоклари билан бириктирилган қувурнинг бўйлама ўқига нисбатан бурчак остида таъсир қилганда, қувурнинг ҳар бир оралиқ бўғини ҳамда унинг ҳар бир уланиш чокини ҳисобга олувчи қувур модели бўйича ҳисоблашларни олиб бориш лозим.



**8-расм. Белгиланган вақтда ер ости қувурининг узунлик бўйича эгувчи моменти қийматларининг ўзгариши:  
1 – (12) формула бўйича; 2 – (13) формула бўйича**

Диссертациянинг “Фазовий сейсмик таъсирларда турли шаклдаги ер ости қувурларининг сейсמודинамикаси” деб номланган тўртинчи бобида фазовий сейсмик таъсирларда турли шаклдаги ер ости қувурларининг сейсמודинамикаси кўриб чиқилган. Турли бурчак остидаги сейсмик юкламаларда фазовий жойлашган мураккаб ортогонал шаклдаги ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати аниқланган. Мураккаб ортогонал ва ноортогонал шаклдаги ер ости қувурлари сейсמודинамикасининг сонли натижаларини таҳлил қилиш билан боғлиқ бир қатор масалалар ҳал қилинган.

Атрофидаги грунт билан ўзаро таъсирдаги *Oxy* текислигида жойлашган ортогонал қувурлар тизимини кўриб чиқамиз. Узунлиги 180 м ва *Oxy* текислигида эни 2 м ва узунлиги 5 м бўлган иккита П-шаклдан иборат ер ости қувурини баҳолаймиз.



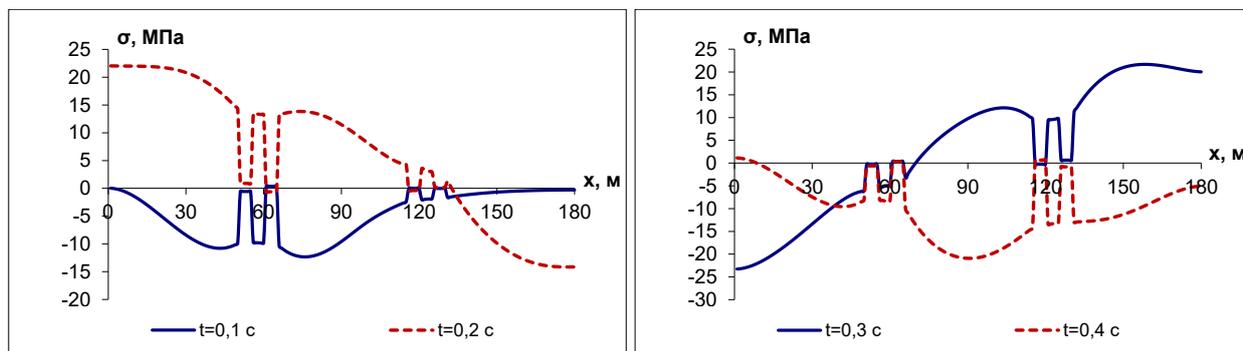
**9-расм. Мураккаб ортогонал шаклдаги қувур қисми**

Қувурнинг чап ва ўнг учлари грунтга маҳкамланган, сейсмик тўлқиннинг таъсир этиш бурчаги  $\alpha=45^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$  бўлиб гармоник функция шаклида берилган бўлсин. Умуман олганда бу муаммо, сейсмик тўлқинлар

таъсирида ер ости қувурларидаги жараёнларни тадқиқ қилиш учун стационар бўлмаган фазовий масала ҳисобланади.

**3-масала.** Ер ости қувури ва грунтнинг механик ва геометрик параметрларини қуйидаги кўринишда танлаймиз:  $E=2 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho=7.8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; тўғри чизикли қисмда  $k_x=1.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=3.9 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>; мураккаб қисмида  $k_x=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=1.3 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $u_0=a_0 \cdot \sin \omega(t-f(x,y,z)/C_p) \cdot H(t-f(x,y,z)/C_p)$ ;  $a_0=0.008$  м;  $\omega=2\pi/T$ ;  $T=0.3$  с;  $f(x,y,z) = \sqrt{(x \cdot \sin \alpha)^2 + (y \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (z \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta)^2}$ ;  $C_p=700$  м/с;  $l=180$  м;  $u_{0x}=u_0 \cdot \cos \alpha$ ;  $u_{0y}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$ ;  $u_{0z}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$ ;  $\mu_{\text{грунт}}=0.2$ ;  $\mu_{\text{труба}}=0.3$ ;  $D_H=0.5$  м;  $D_B=0.49$  м. Берилган тўлқиннинг максимал тезланиши қиймати 3,50 м/с<sup>2</sup> га тенг, бу MSK-64 шкаласи бўйича 9-балли зилзилага мос келади.

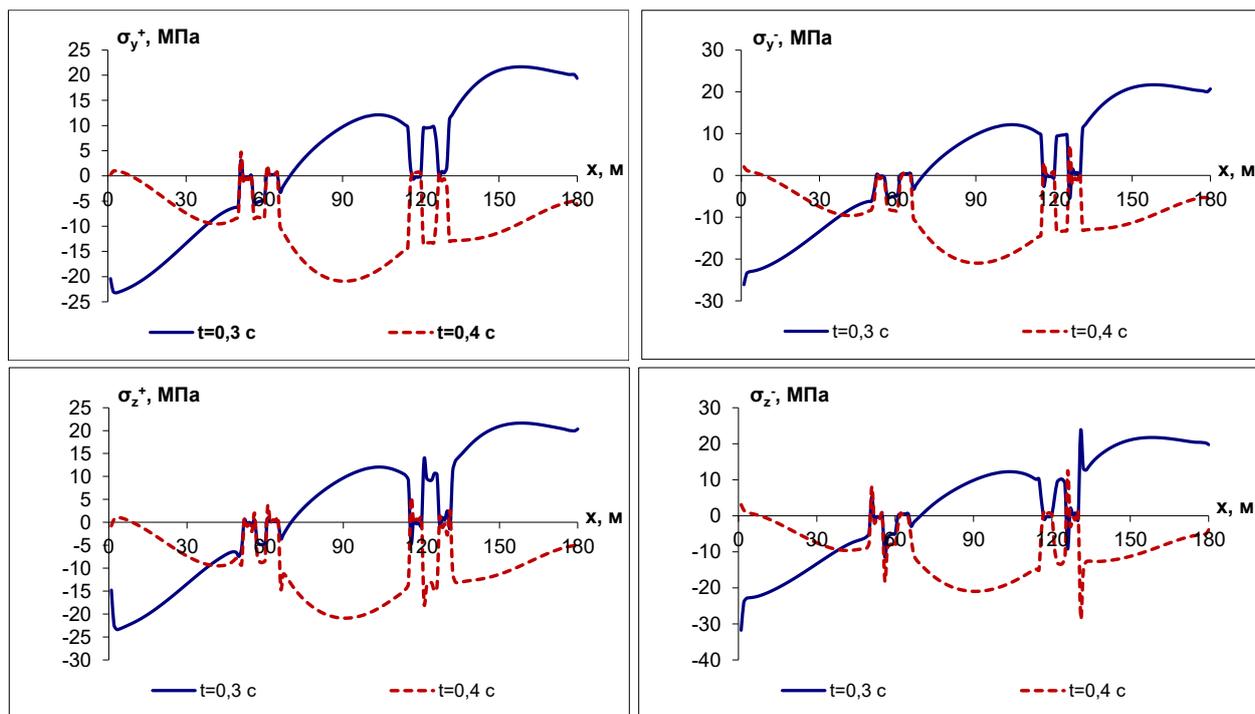
Ҳисоблаш натижаларини келтирамиз. Гармоник тўлқин таъсирида П-шаклдаги қисми мавжуд бўлган қувурдаги кучланишлар 10-расмда келтирилган. Қувурдаги тўлқин шаклининг унинг атрофидаги грунтдаги тўлқиннинг шакли аниқлаб беради. Қувурда ҳам бўйлама, ҳам эгувчи тўлқин шакллари, грунтдаги тўлқиннинг “кўринувчи” тарқалиш тезлиги қувурдаги тўлқиннинг тарқалиш тезлигидан кам бўлган тақдирда, грунтдаги тўлқинларнинг шаклларига ўхшаш бўлади. Грунтнинг тўлқин мавжуд бўлмаган ҳудудда, қувурнинг тебранишлари тўлқин энергиясини атрофдаги грунтга ўтиб кетиши ҳисобига тез сўнади.



**10-расм. Белгиланган вақт қийматида ер ости қувурининг узунлиги бўйича сиқувчи (чўзувчи) кучланишлари қийматларининг ўзгариши**

10-расмдан кўринадиким, П-шакл қисмининг мавжудлиги ушбу қисм атрофида 20-30 м масофагача бўйлама кучланишларнинг қийматларини камайтиради.

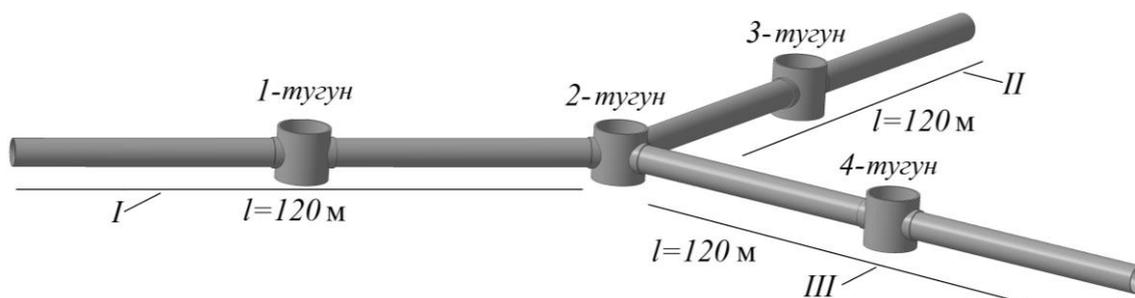
Шу билан бирга, бўйлама куч ва куч моментидан ҳосил бўлган жамланган кучланиш баъзи ҳолатларда фақат П-шаклдаги қисмдан катта бўлиши мумкин (11-расм). П-шаклдаги компенсаторнинг мавжудлиги тўлқиннинг кейинчалик шаклланишини бузади ҳамда шу сабабли ушбу қисмдан кейин тўлқин қувурда қайтадан шакллана бошлайди. Гармоник тўлқин таъсирида кўрилаётган динамик жараён иккинчи тебраниш давридан бошлаб стационар режимга чиқади.



**11-расм. Белгиланган вақт қийматида ер ости қувурининг узунлиги бўйича тўлиқ кучланишлари ( $\sigma_y^+$ ,  $\sigma_y^-$ ,  $\sigma_z^+$ ,  $\sigma_z^-$ ) қийматларининг ўзгариши**

Диссертациянинг “Реал зилзилаларнинг ёзувлари тўплами таъсирида мураккаб шаклдаги ер ости қувурлари тизими сейсמודинамикасининг тадқиқотлари” деб номланган бешинчи бобида реал зилзилаларнинг ёзувлари тўплами таъсирида мураккаб шаклдаги ер ости қувурлари тизими сейсמודинамикаси кўриб чиқилган. Реал зилзилаларнинг ёзувлари асосида мураккаб ортогонал ва ноортогонал шаклдаги ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати аниқланган.

Ноортогонал бириктирилган ер ости қувурларининг мураккаб тизимини кўриб чиқамиз. 12-расмда ноортогонал шаклдаги қувурлар тизими ва қудуқлар келтирилган. Қудуқлар қувурлар билан қотириб бириктирилган ва грунт билан ўзаро таъсир қилаётган қаттиқ жисм кўринишида моделлаштирилган.



**12-расм. I, II, III мураккаб тармоқли ер ости қувурларининг қисми**

Қудуқлар цилиндр шаклга эга, унга мос равишда масса инерция моментлари ва грунт билан ўзаро таъсири коэффициентлари ҳисобланади. Ер ости қувурларининг чизиқли қисмлари ўртасида ва ушбу учта чизиқли

қисмларнинг туташган жойида қудуқлари бўлган 4 та тугун бўлсин (12-расм). Ушбу тугунлар қувур координатаси бўйича дискретизация қилинганда 61, 121, 181 ва 302 рақамларга эга бўлади.

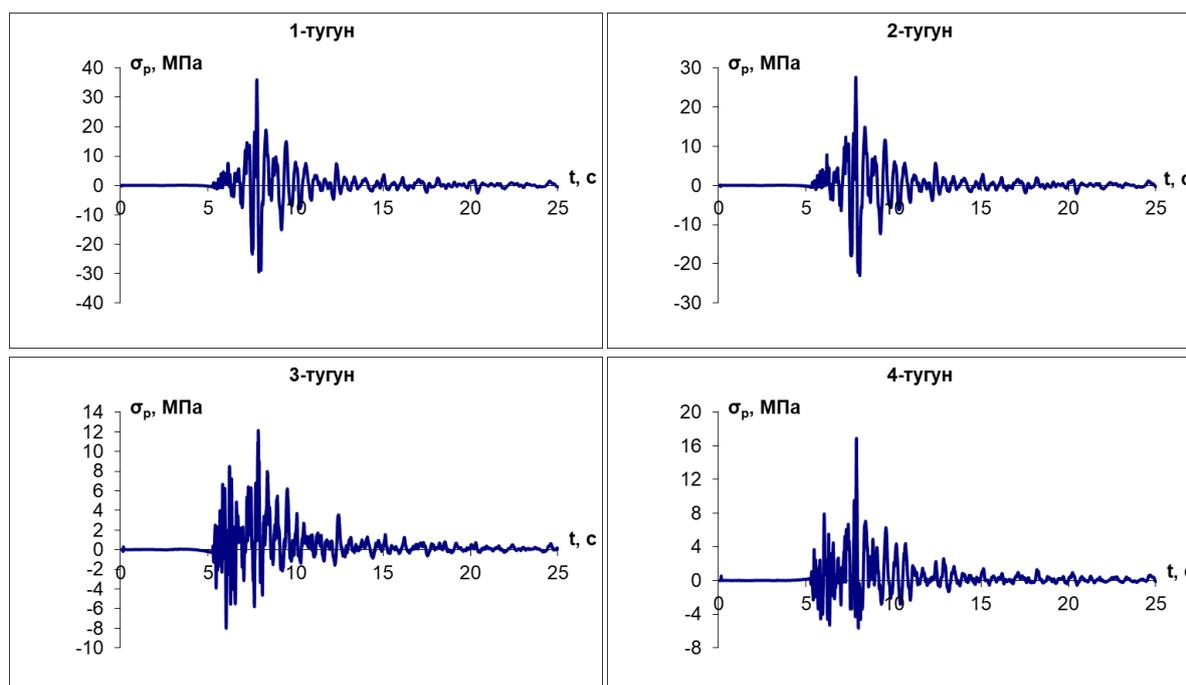
Қувур учлари грунтга маҳкамланган деб фараз қиламиз. 13-расмда кўрсатилган 2002 йил 13 майда Глорийда (АҚШ) содир бўлган реал зилзила ёзувларидаги уч компонентли тўлқиннинг ҳаракатини кўриб чиқамиз.



**13-расм. 2002 йил 13 майда Глорийда (АҚШ) бўлиб ўтган зилзиланинг рақамлаштирилган сейсмограмма ёзувлари**

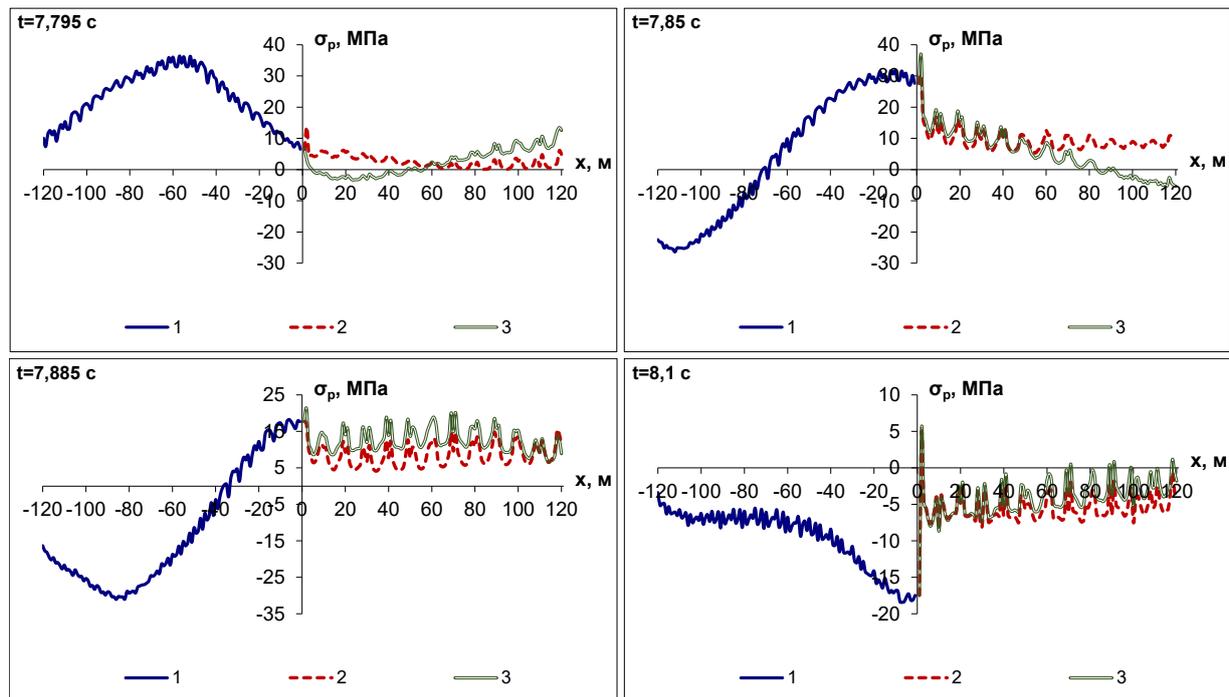
**4-масала.** Мисол сифатида қўйидаги бошланғич маълумотларга эга масалани кўриб чиқамиз. Ер ости қувури ва грунтнинг механик ва геометрик параметрлари қўйидаги қийматларга эга:  $E=2 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho=7.8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $D_H=0.5$  м;  $D_B=0.49$  м;  $k_x=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=1.3 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $C_p=1000$  м/с. Сейсмик тўлқин биринчи қувур ўқи бўйлаб тарқалади. Қудуқ учун:  $E=2.5 \cdot 10^4$  МПа;  $\rho=2.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $D_H^{uz}=1$  м;  $D_B^{uz}=0.9$  м;  $H_{uz}=1$  м;  $k_x^{uz}=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}^{uz}=1.3 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup> мазкур бикр тугун массаси ва унинг грунт билан ўзаро таъсирини ҳисобга олиш учун.

Ер ости қувурининг тугунлари атрофида вақт бўйича тўлиқ кучланишларнинг ўзгариши 14-расмда келтирилган.



**14-расм. Ер ости қувури тугунлари атрофида тўлиқ кучланишларнинг вақт бўйича ўзгариши**

Ер ости қувирида тўлиқ кучланишнинг шаклланишида эгувчи момент асосий ролни ўйнайди. Ер ости қувирида тўлиқ кучланишлари қиймати эгувчи моментнинг ҳисобига катталашади.



**15-расм. Белгиланган вақтларда ер ости I(1), II(2), III(3) қувурларининг ҳар бир чизиқли қисми ўқи бўйлаб тўлиқ кучланишлари қийматларининг ўзгариши**

Белгиланган вақт қийматларида ер ости қувирида узунлиги бўйича тўлиқ кучланишлари қийматларининг ўзгариши 15-расмда келтирилган.

Ер ости қувурлари тизими тўлиқ максимал кучланишларининг қийматларига мураккаб тугун атрофи марказида эришади (15-расм,  $t=7.85$  с ва  $t=8.1$  с). Иккинчи ва учинчи қувурлар бўйича кучланишлар графикларининг фарқланиши уларнинг жойлашиши билан боғлиқ.

15-расмдан кўринадики, ер ости қувурларининг мураккаб тизимлари учун табиий хавфлардан бири, грунтнинг кескин тебранишларини келтириб чиқарувчи ва мураккаб ер ости қувурларининг жиддий шикастланишларига сабаб бўладиган катта интенсивликдаги зилзилалардир.

Тошкент зилзиласининг оқибатлари ҳам шуни кўрсатадики, ер ости қувурларининг шикастланишлари ва бузилишлари ортогонал ва ноортогонал бириктирилган қисмларида содир бўлган. Олинган натижалар зилзилалар оқибатларининг амалдаги маълумотлари билан яхши мос келишини кўрсатиб турибди.

## ХУЛОСА

“Ер ости фазовий қувурлар тизими сейсmodинамикаси усулларини ривожлантириш” мавзусидаги докторлик (DSc) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар асосида кўйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Сейсмик таъсирларда (гармоник, сўнувчи гармоник, импульс кўринишидаги) бўйлама тебранишдаги тўғри чизикли ва тугунли бирикмаларга эга мураккаб тармоқли ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблашнинг усули ва сонли алгоритмлари ишлаб чиқилди. Грунт шароитларини ҳисобга олинган ҳолда, шу жумладан кўмилиш чуқурлиги, геометрияси, қувур чегараларининг турли маҳкамланишини инобатга олувчи ҳисоблашлар ўтказилди.

2. Гамильтон–Остроградский вариацион тамойили асосида ихтиёрий сейсмик таъсирларда фазовий тебранишлардаги ер ости қувури ҳамда абсолют қаттиқ жисм кўринишидаги мураккаб тугуннинг умумлаштирилган дифференциал тенгламалар тизими келтириб чиқарилди. Олинган тенгламалар тизими умумий кўринишдаги қатор масалаларни ҳисоблаш имкониятини беради.

3. Ихтиёрий йўналган реал зилзила ёзувларининг уч компонентли сейсмик таъсирларида турли шаклдаги фазовий жойлаштирилган ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатининг ҳисоби учун ҳисоблаш алгоритми ҳамда дастурий мажмуа ишлаб чиқилди.

4. Сейсмик юкланишнинг таъсир этиш бурчагига боғлиқ қатор сонли натижалар олинди. Сонли эксперимент натижалари шуни кўрсатдики, кенг кўламли ер ости иншоотлари (қувурлари) ва грунт орасидаги ўзаро таъсир кучларига тегишли ҳисоблашларда қабул қилинган гипотезалар асосидаги маълумотлар, зилзилалар таъсири таҳлилидан олинган аниқ маълумотлар билан мос келади.

5. Ўтказилган назарий ва сонли-экспериментал тадқиқотлар сейсмик таъсирларда фазовий жойлаштирилган ортогонал ва ноортогонал шаклдаги ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини баҳолаш муаммоларини ҳал этади. Натижалар таҳлили шуни тасдиқладики, турли шаклдаги ер ости қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати сейсмик тўлқиннинг таъсир этиш бурчагига боғлиқ.

6. Реал зилзила ёзувлари асосида ортогонал ва ноортогонал шаклдаги ер ости қувурларининг максимал кучланишлари пайдо бўладиган хавфли нуқталари аниқланди. Компенсаторларнинг мавжудлиги умумий ҳолда 20-30 м масофагача компенсаторларнинг атрофидаги нормал кучланишларнинг камайишига олиб келиши хулоса қилинди.

7. Реал зилзила ёзувлари тўплами таъсиридаги тугун билан бириктирилган ортогонал ва ноортогонал шаклли қовушқоқ-эластик ўзаро таъсирдаги ер ости қувурлари сейсmodинамикасининг янги масалалари ҳал этилди. Кўрилган мисолларда эластик ва қовушқоқ-эластик натижалар

орасидаги фарқ 15-20% ни ташкил қилди. Грунт қовушқоқлигини ҳисобга олиш грунт ва ер ости қувури орасидаги энергия алмашинувини оширади.

8. Ёзиб олинган реал сейсморамамалар таъсирида ер ости иншоотларини ҳисоблашда сейсмограммалар таркибидаги сейсмик жараённинг барча хусусиятлари ҳисобга олинади, шунинг учун сейсмик таъсирда иншоот ҳаракатининг ҳақиқий кўринишини характерлайди, тадқиқ қилинаётган объектдаги ҳақиқий кучланишларни аниқлаш имконини беради. Бу, ер ости қувуридаги максимал кучланишларни аниқ ҳисоблаш ишларини олиб боришга ҳамда қурилиш майдончасида грунт шароитлари учун маълум бир қувурнинг сейсмик мустаҳкамлиги тўғрисида ишончли хулосалар чиқариш имконини беради.

9. Диссертация ишининг натижаларидан ҚМҚ 2.01.03-19 “Зилзилавий ҳудудларда қурилиш” меъёрий ҳужжатининг “Ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқлари” IV бўлимини янги вариантини ишлаб чиқишда фойдаланилди (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирининг 2019 йил 15 октябрдаги №480–сон буйруғи).

10. Олинган натижалар, ер ости қувурларини лойиҳалашда фойдаланилган (Наманган вилоятидаги “Ичимлик суви ва канализация тармоқлари” объекти), бу билан иш сифати ва меҳнат унумдорлигини ортишига, ҳисоблаш вақтининг 2-3 марта тежалишига, иншоотнинг турғунлиги ҳамда чидамлилигини 1,2 марта захира билан таъминланишига эришилди. Қурилиш майдонининг сейсмик интенсивлигини ҳисобга олган ҳолда, олинган натижалар қувурларнинг кўмилиш чуқурлигини 15–20 % гача камайтириш имконини берди.

Муаллиф диссертация мавзусини қўйилиши, муҳокамаси ва уни амалиётга татбиқ этилишида берган муҳим маслаҳатлари ҳамда амалий ёрдами учун илмий маслаҳатчиси ЎзР ФА академиги т.ф.д., профессор Т. Рашидовга, шунингдек, ҳаётни таъминловчи ер ости тизимларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати натижаларини олиш жараёнини тезлаштиришга, қўйилган масалани алгоритмлари ва универсал амалий дастурий таъминотларни ишлаб чиқишдаги маслаҳатлари учун т.ф.д. Т. Юлдашев ҳамда ф.-м.ф.д., профессор И. Мирзаевга ўз миннатдорчилигини билдиради.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ НА ОСНОВЕ НАУЧНОГО СОВЕТА  
DSc.18/30.12.2019.Т.09.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ  
ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТРАНСПОРТНОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

**БЕКМИРЗАЕВ ДИЁРБЕК АБДУГАППОРОВИЧ**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ СЕЙСМОДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ  
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ**

**05.09.02 – Основания, фундаменты и подземные сооружения.  
Мосты и транспортные тоннели. Дороги, метрополитены  
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА  
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК (DSc)**

**Ташкент – 2021**

Тема докторской диссертации по техническим наукам (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2021.2.DSc/T331.

Диссертация выполнена в Институте механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице ([www.tstu.uz](http://www.tstu.uz)) и на Информационно-образовательном портале «Ziyouet» ([www.ziyouet.uz](http://www.ziyouet.uz)).

**Научные консультант:**

**Рашидов Турсунбай**

доктор технических наук, профессор, академик

**Официальные оппоненты:**

**Расулов Хаят Зайирович**

доктор технических наук, профессор

**Хусанов Бахтияр Эргашбаевич**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

**Миралимов Мирзохид Хамитович**

доктор технических наук

**Ведущая организация:**

**Ферганский политехнический институт**

Защита диссертации состоится «25» июня 2021 года в 9<sup>00</sup> часов на заседании разового научного совета на основе Научного совета DSc.18/30.12.2019.T.09.01 при Ташкентском государственном транспортном университете. (Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирийўлчилар, 1. Тел./факс: (+99871) 299-00-01, e-mail: rektorat(@tstu.uz, tashiit@exat.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного транспортного университета (зарегистрирована за № 024 ). Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирийўлчилар, 1. Тел.: (+99871) 299-00-01.

Автореферат диссертации разослан «12» июня 2021 года.  
(реестр протокола рассылки № 1 от «22» мая 2021 года).



**А.А. Рискулов**

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

**Н.А. Нишинов**

Ученый секретарь разового научного совета по присуждению ученых степеней, PhD, с.н.с.

**А.А. Ишанходжаев**

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

## ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире, в частности, в США, Китае, Японии, России, Турции, Индии, Италии, Иране и др., особое внимание уделяется развитию сейсмобезопасности и сейсмостойкости подземных трубопроводных систем: газо-, водо-, нефте-, теплопроводов и канализации. Системы трубопроводов используются для водоснабжения и сброса сточных вод, для обеспечения природным газом и жидким топливом, энергией и коммуникациями, и играют важную роль не только в современной жизни, но и в управлении бедствиями и устранении последствий после землетрясения. По этой причине, их структурная безопасность в таких экстремальных условиях, как сильные землетрясения, должна быть обеспечена, особенно когда большое количество токсичных и горючих материалов находится и транспортируется в этих сооружениях. В этом плане достигнуты определенные успехи в развитых зарубежных странах, огромное внимание уделяется на проектирование и строительство сейсмостойких сооружений и обеспечения сейсмической безопасности развивающихся крупных городов в мире.

В мире особое внимание уделяется наиболее глубокому исследованию проблем сейсмической безопасности подземных систем жизнеобеспечения, расположенных в различных грунтовых условиях. Особую роль в этом плане играют модельные лабораторные экспериментальные исследования на виброплатформе и центрифуге в грунтах и песках для построения модели взаимодействия «труба-грунт». Однако, на практике анализ реакции землетрясения прямого трубопровода недостаточен, чтобы объяснить сейсмическую уязвимость целой системы трубопроводов. В связи с этим, важным является исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) Г, II и Т-образных трубопроводов при действии сейсмической нагрузки. При этом одной из основных задач теоретического и прикладного исследования является задача математического описания взаимодействия грунта с подземным сооружением.

С обретением независимости в нашей республике в сейсмических районах, в которых развиваются газовая, нефтяная промышленность, нефтехимия и многие др., проводятся широкомасштабные мероприятия, направленные на обеспечение сейсмостойкости подземных сооружений при воздействии сейсмических нагрузок. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан определены задачи, в том числе «...повышение уровня обеспеченности коммунально-бытовыми услугами, ... обеспечение населения в сельской местности чистой питьевой водой путем строительства новых водопроводных линий...»<sup>1</sup>. При выполнении данной задачи имеет важное значение получение полной научно обоснованной информации о напряженно-деформированном состоянии подземных систем жизнеобеспечения различной сложной геометрической конфигураций в особых грунтовых условиях, расчет подземных трубопроводов, соединенных стыками, при произвольных сейсмических нагрузках, разработка расчетных

---

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

алгоритмов решения задач сейсмостойкости пространственных систем трубопроводов, совершенствование методов расчета сейсродинамики подземных трубопроводов при воздействии сейсмических сил в виде реальных записей землетрясений.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПП-4794 от 30 июля 2020 года «О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан» и Постановлении Кабинета Министров Республики Узбекистан №515 от 26 августа 2020 года «О дальнейшем совершенствовании государственной системы предупреждения и действий в чрезвычайных ситуациях Республики Узбекистан», а также в других нормативно-правовых документах, имеющих отношение к данной деятельности.

**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, сейсробезопасность зданий, сооружений и строительство».

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации<sup>2</sup>.** В научных центрах, высших образовательных учреждениях American Society of Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Southwest Research Institute Report to the American Gas Association (США), Seismic Design for Gas Pipelines, Japan Gas Association (Япония), Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (Турция), Department of Building Engineering, Tongji University, Department of Building and Construction, City University of Hong Kong (Китай), Department of Hydraulic, Geotechnical and Environmental Engineering, Federico II University (Италия), University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy (Болгария) и др. осуществляются научно-исследовательские работы по решению проблем сейсмостойкости подземных и наземных трубопроводов. Ведутся также исследования по применению численных методов к решению задач сейсмостойкости сооружений в Центре исследований сейсмостойкости сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (Россия), National Information Center of Earthquake Engineering, Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures (Индия), Department of Civil Engineering – Isfahan University of Technology (Иран), Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз (Узбекистан) и других странах мира.

В результате исследований в мире по усовершенствованию методов динамических расчетов подземных трубопроводов с различными граничными условиями и видами нагружений получен ряд научных

---

<sup>2</sup> Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации осуществлено на основе следующих источников: <https://www.asce.org/>; <https://ce.berkeley.edu/>; <http://mceer.eng.buffalo.edu>; <http://link.springer.com/>; [www.alireza.azarbakht.info/files/papers/JP\\_2014-8.pdf](http://www.alireza.azarbakht.info/files/papers/JP_2014-8.pdf); [www.researchinventory.com/](http://www.researchinventory.com/); <http://sdgee.civil.auth.gr/>; [www.geengineeringssystem.com/](http://www.geengineeringssystem.com/); [www.preventionweb.net/](http://www.preventionweb.net/); <http://apapad.users.uth.gr/>; The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, China; The 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon и др.

результатов. В частности, усовершенствованы экспериментальные и численные методы определения напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях с учетом активных разломов, обвалов, трещин и разжижения, где происходят сильные движения грунта, эффект нелинейности грунта, по аналогии с геометрической и физической нелинейностями (American Society of Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering University of California, США; Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Турция; City University of Hong Kong, Китай); сформулированы основные задачи сейсродинамики трубопровода (совместного движения упругой среды и стержня), построена динамическая модель совместного сейсмического колебания среды и сегментного трубопровода с податливыми стыками (Московский государственный университет, Россия); разработаны алгоритм решения и программно-расчетный модуль динамического анализа напряженно-деформированного состояния и параметров движения линейной части заглубленного в грунт магистрального трубопровода на сейсмические нагрузки с произвольной ориентацией оси нефтепровода к вектору волны (Московский государственный технический университет, Россия); составлена математическая модель нефтепровода, находящегося в скальном грунте, для расчета напряженно-деформированного состояния при воздействии взрывных волн (Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Россия); усовершенствованы численные методы оценок напряженно-деформированного состояния прямолинейного состыкованного подземного трубопровода при распространении поверхностных волн (Soochow University, China; Isfahan University of Technology, Iran; University of Naples Federico II, Italy); разработаны динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений и волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений (Институт механики и сейсмостойкости сооружений, Узбекистан).

**Степень изученности проблемы.** Научные теоретические и экспериментальные исследования по прочности подземных трубопроводов при сейсмических нагрузениях проведены такими крупными учеными мира, занимающимися сейсмостойкостью сооружений, как M.J. O'Rourke, L.R. Wang, N. Suzuki, A. Sakurai, T.D. O'Rourke, N.M. Newmark, El. Hmadi, T. Takahashi, T. Tanaka, K. Yoshizaki, X.L. Liu, I.C. Anderson, S.B. Johnston, V. Corrado, Д.Д. Баркан, Т.Р. Рашидов, В.А. Ильичев, Я.М. Айзенберг, А.Г. Назаров, А.Б. Айнбиндер, Ш.Г. Напетваридзе, А.С. Гехман, М.Ш. Исраилов, А.А. Александров, Р.А. Гумеров, Э.Н. Фигаров и много других из ведущих мировых научных центров, университетов и научно-исследовательских институтов.

Итоги теоретических и практических исследований в области сейсмостойкости подземных трубопроводов более детально рассмотрены в монографии M.J. O'Rourke и X.L. Liu (1999). Глубокий анализ результатов данного монографического исследования позволяет проследить историю становления и развития сейсродинамики в различных странах мира.

Сейсродинамическая теория подземных сооружений разработана в Узбекистане. Она основана на фактических данных по последствиям

прошедших, в первую очередь, Ашгабатского (1948) и Ташкентского (1966), землетрясений. Более полувека назад, когда только начинала формироваться динамическая теория сейсмостойкости подземных трубопроводов, сведений о повреждениях и разрушениях подземных сооружений при землетрясениях практически не было. Имелись лишь единичные данные о последствиях землетрясений в Японии (Токио, 1923 г.), США (Калифорния, 1906 г.), Туркмении (Ашгабат), Узбекистане (Ташкент) и др. Это объяснялось еще и тем, что в то время протяженность подземных трубопроводов в сейсмоактивных зонах была сравнительно невелика, обнаружить их повреждения было затруднительно.

В нашей стране рядом ученых проведены научно-исследовательские работы по развитию повышения сейсмической прочности подземных трубопроводов. Научные исследования по проблемам динамики сооружений, взаимодействующих с грунтом, использование различных математических моделей, а также отдельные задачи, связанные с конкретными расчетами трубопроводов, в разные годы были проведены Я.Н. Мубараковым, Г.Х. Хожметовым, А.А. Ишанходжаевым, Б.М. Мардоновым, М. Мирсаидовым, К.С. Султановым, И. Мирзаевым, Т. Юлдашевым, Ш. Юлдашевым, Х.З. Расуловым, Т. Мавляновым, Ш.М. Маматкуловым, К.Д. Салямовой, И. Сафаровым, Б.Э. Хусановым, М.К. Усаровым, Х.С. Сагдиевым, А. Каюмовым, А.Х. Маткаримовым, В.А. Омеляненко, М. Хазраткуловым, С.Ф. Проскуриной, А.Ю. Юсуповым, З.Р. Тешабаевым, У. Рахмановым, Т.Т. Собировым, Е.Н. Колмаковой и др.

В действующем нормативном документе (КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах», раздел IV «Подземные сооружения и инженерные сети») не содержится в достаточной степени сведений и специальных указаний по расчету напряженно-деформированного состояния подземных сооружений сложной конфигурации. Наряду с этим, как показывает анализ сейсмодинамики подземных трубопроводов зарубежных стран, в недостаточной мере изучены методы расчета сложных систем подземных трубопроводов. Поэтому в данной диссертации рассматривается сейсмодинамика пространственных систем подземных трубопроводов сложной конфигурации.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими планами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Института механики и сейсмостойкости сооружений по темам: Ф4-ФА-Ф047 «Сейсмодинамика подземных трубопроводных систем сложной конфигурации, расположенных в грунтах с нарушенной структурой» (2012–2016), ФА-А14-Ф019 «На основе инженерного анализа последствий мировых сильных землетрясений и новых исследований разработать рекомендации для актуализации методов расчета и проектирования сейсмостойких подземных инженерных сооружений» (2015–2017), ФА-Ф-4-006 «Сейсмодинамика плоско и пространственно расположенных подземных трубопроводных систем при произвольном угле атаки воздействия» (2017–2020), MRU-FA-58/2017 «Акустические барьеры для защиты от сейсмических воздействий: разработка концепции,

математических моделей и численных алгоритмов» и ФА-Атех-2018-67 «Оценка реакций подземных трубопроводов на действие набора реальных записей землетрясений и их внедрение» (2018–2020).

**Целью исследования** является развитие методов сейсмодинамики подземных пространственных трубопроводных систем сложной конфигурации при произвольном направлении сейсмического воздействия, в том числе на основе реальных записей землетрясений.

**Задачи исследования:**

разработать методику и численные алгоритмы решения задач продольных колебаний прямолинейных и сложных систем подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях (гармонической, затухающей гармонической, импульсной);

разработать механико-математические модели подземных трубопроводных систем при произвольном направлении сейсмического нагружения на основе вариационного принципа Гамильтона–Остроградского (общая постановка);

разработать методику численного расчета напряженно-деформированного состояния состыкованных подземных трубопроводов при произвольно направленном сейсмическом нагружении;

разработать методику решения задач сейсмодинамики подземных трубопроводов ортогональной и неортогональной конфигураций;

разработать метод определения напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов с узловыми соединениями ортогональной и неортогональной конфигураций на основе реальных записей землетрясений;

создать комплекс программ для персональных компьютеров по решению класса рассматриваемых задач сейсмодинамики подземных трубопроводов и получить соответствующие свидетельства на него;

провести многовариантные вычислительные эксперименты по исследованию динамики подземных трубопроводов различной конфигурации при различных сейсмических нагружениях и на основе реальных записей землетрясений для применения на практике.

**Объектом исследования** являются плоско и пространственно расположенные подземные трубопроводные системы различной конфигурации (водопроводы, газопроводы, нефтепроводы и др.), расположенные в сейсмических зонах республики.

**Предмет исследования** составляют процессы сейсмодинамики подземных пространственных трубопроводных систем различной конфигурации.

**Методы исследования.** В процессе исследования применены методы механики деформируемого твердого тела и строительной механики, вычислительной математики, математического моделирования, численные методы, методы программирования, методы вычислительного эксперимента.

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

усовершенствованы методы и численные алгоритмы решения задач сейсмодинамики продольных колебаний прямолинейных и сложных систем

подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях (гармонической, затухающей гармонической, импульсной);

разработана обобщенная система дифференциальных уравнений пространственных колебаний подземного трубопровода и сложного узла как абсолютно твердого тела при произвольных сейсмических воздействиях на основе вариационного принципа Гамильтона–Остроградского;

разработана методика решения новых задач сейсродинамики состыкованных подземных трубопроводов при произвольном направлении сейсмического нагружения;

разработан новый вычислительный алгоритм на основе методов конечных элементов и конечных разностей для решения задач сейсродинамики подземных пространственных трубопроводных систем ортогональной и неортогональной конфигураций;

впервые разработан метод определения напряженно-деформированного состояния задач сейсродинамики подземных трубопроводов с узловым соединением ортогональной и неортогональной конфигураций на основе реальных записей землетрясений.

**Практические результаты исследования** состоят в следующем:

разработан комплекс программ для определения напряженно-деформированного состояния при исследовании сейсродинамики пространственных систем подземных трубопроводов;

разработан программный комплекс для расчета подземных сооружений и инженерных сетей в сейсмических районах на основе строительных норм и правил КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах»;

использование разработанной методики расчета подземного трубопровода в сейсмических зонах при проектировании (объект «Питьевая вода и канализационные сети», в Наманганской области) способствовало повышению качества и эффективности работ, сокращению времени расчета в 2–3 раза, обеспечило устойчивость с запасом прочности сооружения в 1,2 раза. Полученные результаты позволили уменьшить глубину заложения трубопроводов на 15–20% с учетом сейсмической интенсивности строительной площадки;

результаты диссертационной работы использованы Научно-исследовательским проектно-изыскательским институтом гражданского строительства «ToshujoyLIT» при подготовке переработанного варианта нормативного документа КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах» раздела IV «Подземные сооружения и инженерные сети»;

результаты исследований внесены в раздел IV «Подземные сооружения и инженерные сети» в актуализированный нормативный документ КМК 2.01.03-19 «Строительство в сейсмических районах».

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследования основана на применении математических методов и полученных результатов с использованием современных методов и средств, сопоставлении с известными результатами, а также сравнении результатов теоретических исследований с реальными данными, подтвержденными на практике.

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

Научная значимость полученных результатов исследования подтверждается тем, что разработанная методика численного расчета и математические модели описывают процессы сейсмодинамики подземных пространственных трубопроводных систем различной конфигурации.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики расчета сейсмодинамики пространственных систем подземных трубопроводов, вычислительных алгоритмов и комплекса программных средств, что в совокупности образует единую концепцию формализации расчета сейсмодинамики подземных трубопроводов. Это существенно улучшает и ускоряет процессы проектирования и строительства указанных подземных трубопроводов (водо- и газоснабжение, нефтепроводы и др.) в сейсмических зонах, повышает качество работ, служит значительному снижению сейсмического риска, а также способствует достижению стабильной работы жизнеобеспечивающих сложных систем.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных научных результатов исследования процесса сейсмодинамики пространственных систем подземных трубопроводов:

разработанная программа для расчета подземных сооружений и инженерных сетей в сейсмических районах на основе строительных норм и правил КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах» использована при расчете проектируемых объектов «ToshuyjoyLITI», «O'ZBEKKOMMUNALLOYIHAQURILISH» и «QISHLOQQURILISH-LOYIHA» Министерства строительства Республики Узбекистан (Справка Министерства строительства Республики Узбекистан №09-06/6406 от 19 августа 2020 г.) Использование научных результатов позволяет ресурсосбережению, повышению качества работ и сокращению времени расчета в 2–3 раза при процессе проектирования;

практические расчеты по усовершенствованному методу для определения напряженно-деформированного состояния пространственных систем подземных трубопроводов при сейсмических нагрузениях внедрены и использованы в «ToshuyjoyLITI» при переработке и дополнении нормативного документа КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах» раздела IV «Подземные сооружения и инженерные сети» (Справка Министерства строительства Республики Узбекистан №09-06/6406 от 19 августа 2020 г.). Применение научных результатов позволит предотвратить повреждения и разрушения подземных трубопроводов, а также с экономической точки зрения, уменьшить расходы при авариях и строительно-монтажных работах в чрезвычайных случаях;

методика определения влияния колодцев подземных трубопроводов на сейсмостойкость и оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов, соединенных с колодцами использована при переработке раздела IV «Подземные сооружения и инженерные сети» нормативного документа КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах», с изменениями и дополнениями передана в Министерство строительства Республики Узбекистан для практического использования (справка Министерства строительства Республики Узбекистан от 19 августа 2020 г.

№ 09-06-6406). Применение научных результатов позволит повысить сейсмостойкость подземных сооружений и снизить последствия от возможных сильных землетрясений.

созданная методика расчета сейсмостойкости пространственных подземных трубопроводных систем при произвольном направлении сейсмических нагрузок внедрена в процесс расчета и проектирования подземных трубопроводов на предприятиях Министерства строительства Республики Узбекистан ЧП «KELAJAK-S» (Справка Министерства строительства Республики Узбекистан №09-06/6406 от 19 августа 2020 г.). Применение результатов исследования в процессе проектирования способствовали сокращению времени расчета в 2–3 раза, обеспечению устойчивости и запаса прочности объекта в 1.2 раза. Внедрение научного результата дает возможность уменьшить глубину заложения трубопроводов на 15–20% с учетом сейсмической интенсивности строительной площадки.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационного исследования обсуждались на 8 научно-практических конференциях, в том числе на 6 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликованы всего 35 научных работ. Из них 17 научных статей, в том числе 12 в республиканских и 5 в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, издана 1 монография.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и 5 приложений. Объем диссертации составляет 197 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены 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, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложено внедрение в практику результатов исследования, приведены сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Состояние изученности практических задач сейсмодинамики подземных трубопроводов**» произведен аналитический обзор современного состояния научной проблемы и изученности исследований практических задач сейсмодинамики подземных трубопроводов. Рассмотрены традиционные задачи о продольных колебаниях прямолинейных и сложных систем подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях. Разработаны алгоритмы компьютерной

реализации и решения задач напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях.

В период 1960–1980 гг. проведен ряд лабораторных и натурных экспериментальных исследований по изучению взаимодействия элементов подземных трубопроводов с грунтом и между собой в различных условиях. Сконструированы экспериментальные установки для определения параметров статического действия на них продольных и поперечных сил, изгибающего и крутящего моментов. Описана методика проведения экспериментов.

Наряду с этим на сегодняшний день существует ряд актуальных проблем. Как известно, трубопроводные системы жизнеобеспечения состоят из прямолинейных трубопроводов, присоединенных к узлам, из нескольких трубопроводов, состыкованных между собой ортогонально и неортогонально. В этом случае сейсмические волны будут воздействовать на такую систему трубопроводов при произвольном угле атаки в пространстве. Для подземной системы произвольно расположенных трубопроводов при произвольном угле атаки сейсмического воздействия в пространстве требуется разработать новые расчетные математические модели определения напряженно-деформированного состояния.

В настоящее время сильные землетрясения, происшедшие в нашей стране и за рубежом, показывают, что для снижения катастрофических явлений большое значение имеют предварительная оценка опасности от землетрясений и своевременное рассмотрение соответствующих мер (проблемы оценки сейсмического риска и их снижение). Требуется разработать новые расчетные математические модели, алгоритмы и прикладные программы определения напряженно-деформированного состояния и устойчивости подземных трубопроводов на действие набора реальных записей (сейсмограмм и акселерограмм) землетрясений.

Во второй главе диссертации **«Математическое моделирование динамики подземных трубопроводных систем при пространственных сейсмических воздействиях»** рассмотрены современные новые задачи–сейсмодинамика подземных трубопроводов при произвольном сейсмическом нагружении на основе вариационного принципа Гамильтона–Остроградского. Выведена система дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями. Разработаны методика и компьютерная реализация решения краевых задач подземных трубопроводов при произвольном сейсмическом нагружении. Выведены системы дифференциальных уравнений сложного узла как абсолютно твердого тела, взаимодействующего с окружающим грунтом.

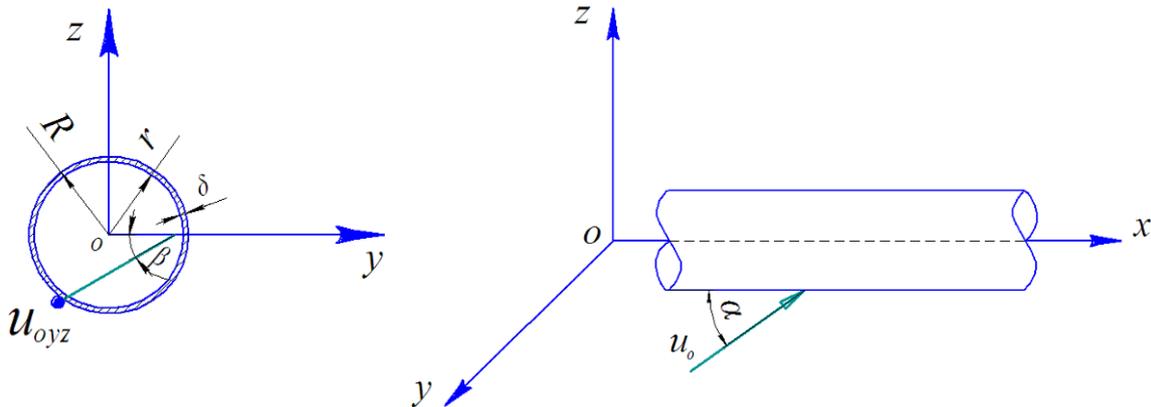
**Вариационный принцип Гамильтона–Остроградского для подземных трубопроводов.** Анализ последствий сильных землетрясений показывает, что сейсмостойкость подземных сооружений зависит от направления сейсмической волны. Это объясняется тем, что подземные сооружения при землетрясениях находятся под действием произвольного направления нагружения и оценка напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов при сложных колебаниях является актуальной и служит определению возможной сейсмической опасности.

Для изучения продольных, поперечных и крутильных колебаний подземных трубопроводов при произвольном направлении сейсмического нагружения применим прикладную теорию колебаний стержней.

Вариационный принцип Гамильтона–Остроградского для подземного трубопровода имеет вид

$$\int_t (\delta T - \delta \Pi + \delta A) dt = 0, \quad (1)$$

где  $\delta T$ ,  $\delta \Pi$  – вариации кинетической и потенциальной энергий;  $\delta A$  – вариации работы внешних сил;  $t$  – время.



**Рис.1. Схема подземного трубопровода при произвольном направлении сейсмического нагружения**

На основе допущений, трубопровод моделируется в виде стержня (рис.1), а перемещения устанавливаются следующим образом:

$$u_1 = u - y\alpha_1 - z\alpha_2, \quad u_2 = v + z\theta, \quad u_3 = w - y\theta, \quad (2)$$

где компоненты  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  – перемещения любой точки трубопровода;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – продольные, поперечные перемещения оси трубопровода;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – углы поворота оси трубы при чистом изгибе;  $\theta$  – угол кручения оси трубопровода.

Принимаем, что трубопровод деформируется в пределах упругости. Поэтому для материала трубопровода рассматривается закон Гука

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11}, \quad \sigma_{12} = G\varepsilon_{12}, \quad \sigma_{13} = G\varepsilon_{13}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – деформации, соотношения Коши для них имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} - y \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} - z \frac{\partial \alpha_2}{\partial x}, \quad \varepsilon_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} + z \frac{\partial \theta}{\partial x} - \alpha_1, \\ \varepsilon_{13} &= \frac{\partial u_3}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} - y \frac{\partial \theta}{\partial x} - \alpha_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Вариация кинетической энергии трубопровода

$$\int_t \delta T dt = \int_t \int_V \left[ \rho \frac{\partial u_1}{\partial t} \delta \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_2}{\partial t} \delta \frac{\partial u_2}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_3}{\partial t} \delta \frac{\partial u_3}{\partial t} \right] dV dt. \quad (5)$$

Вариация потенциальной энергии трубопровода

$$\int_t \delta \Pi dt = \int_t \int_V (\sigma_{11} \delta \varepsilon_{11} + \sigma_{12} \delta \varepsilon_{12} + \sigma_{13} \delta \varepsilon_{13}) dV dt. \quad (6)$$

Вариация работы внешних сил трубопровода

$$\begin{aligned} \int_t \delta A dt = & \int_t \int_V [P_1 \delta u_1 + P_2 \delta u_2 + P_3 \delta u_3] dV dt + \int_t \int_S [q_1 \delta u_1 + \\ & + q_2 \delta u_2 + q_3 \delta u_3] dS dt + \int_t \int_{S_1} [\varphi_1 \delta u_1 + \varphi_2 \delta u_2 + \varphi_3 \delta u_3] dS_1 dt \Big|_x, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $P_1, P_2, P_3$ —объемные силы;  $q_1, q_2, q_3$ —поверхностные силы,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ —торцевые силы.

Выражения вариаций кинетической (5), потенциальной энергий (6) и работы внешних сил (7) трубопровода подставляем в вариационный принцип Гамильтона–Остроградского (1), получим следующую вариационную систему уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} \int_t (\delta T - \delta \Pi + \delta A) dt = & \int_t \int_x \left[ \rho F \frac{\partial u}{\partial t} \delta u + \rho I_z \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} \delta \alpha_1 + \rho I_y \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} \delta \alpha_2 + \rho F \frac{\partial v}{\partial t} \delta v + \right. \\ & + \rho F \frac{\partial w}{\partial t} \delta w + \rho I_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \delta \theta \Big] dx \Big|_t + \int_t \int_x \left\{ \left[ -\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + EF \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + N_x(P_1) + N_x(q_1) \right] \delta u + \right. \\ & + \left[ -\rho I_z \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + EI_z \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial x^2} + GF \frac{\partial v}{\partial x} - GF \alpha_1 - (M_z(P_1) + M_z(q_1)) \right] \delta \alpha_1 + \left[ -\rho I_y \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} + \right. \\ & + EI_y \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial x^2} + GF \frac{\partial w}{\partial x} - GF \alpha_2 - (M_y(P_1) + M_y(q_1)) \Big] \delta \alpha_2 + \left[ -\rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + GF \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \right. \\ & - GF \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} + (Q_{12}(P_2) + Q_{12}(q_2)) \Big] \delta v + \left[ -\rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + GF \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - GF \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} + Q_{13}(P_3) + \right. \\ & + Q_{13}(q_3) \Big] \delta w + \left[ -\rho I_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + GI_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + (M_x(P_2, P_3) + M_x(q_2, q_3)) \right] \delta \theta \Big\} dx dt + \\ & + \left\{ \left[ \left( -EF \frac{\partial u}{\partial x} + N_x(\varphi_1) \right) \delta u + \left( -EI_z \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} - M_z(\varphi_1) \right) \delta \alpha_1 + \left( -EI_y \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} - M_y(\varphi_1) \right) \delta \alpha_2 + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left( -GF \frac{\partial v}{\partial x} + GF\alpha_1 + Q_{12}(\varphi_2) \right) \delta v + \left( -GF \frac{\partial w}{\partial x} + GF\alpha_2 + Q_{13}(\varphi_3) \right) \delta w + \\
& + \left( -GI_p \frac{\partial \theta}{\partial x} + M_x(\varphi_2, \varphi_3) \right) \delta \theta \Bigg]_{,x} \Bigg\} dt = 0.
\end{aligned}$$

**Системы дифференциальных уравнений сложного узла как абсолютно твердого тела.** В сложном узле системы рассмотрим пространственную систему координат ( $Oxyz$ ). На основе гипотезы Власова – Джанелидзе – Кабулова и вариационного принципа формируется математическая модель абсолютно жесткого узла сложных подземных трубопроводов.



**Рис.2. Схема пространственного сложного узла**

Сложный узел показан на рис.2. Перемещения сложного узла принимаем в виде

$$u_1 = u^0 - y\alpha_1^0 - z\alpha_2^0, \quad u_2 = v^0 + z\theta^0, \quad u_3 = w^0 - y\theta^0, \quad (8)$$

где  $u_1, u_2, u_3$  – перемещения точки узла;  $u^0$  – продольное перемещение узла;  $v^0, w^0$  – поперечные перемещения узла;  $\alpha_1^0, \alpha_2^0$  – углы поворота сечения узла;  $\theta^0$  – угол кручения узла.

Вариация кинетической энергии. При этом вариация кинетической энергии сложного узла абсолютно твердого тела имеет вид

$$\int_t \delta T dt = \int_t \int_V \left[ \rho \frac{\partial u_1}{\partial t} \delta \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_2}{\partial t} \delta \frac{\partial u_2}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_3}{\partial t} \delta \frac{\partial u_3}{\partial t} \right] dV dt. \quad (9)$$

Вариация работы внешних сил, действующих на абсолютно твердый сложный узел имеет вид

$$\begin{aligned}
\int_t \delta A dt &= \int_t \int_V [P_1 \delta u_1 + P_2 \delta u_2 + P_3 \delta u_3] dV dt + \int_t \int_S [q_1 \delta u_1 + q_2 \delta u_2 + q_3 \delta u_3] dS dt = \\
&= \int_t \int_V [P_1 \delta (u^0 - y\alpha_1^0 - z\alpha_2^0) + P_2 \delta (v^0 + z\theta^0) + P_3 \delta (w^0 - y\theta^0)] dV dt + \\
&+ \int_t \int_S [q_1 \delta u_1 + q_2 \delta u_2 + q_3 \delta u_3] dS dt.
\end{aligned} \quad (10)$$

Рассмотрим выражения

$$\int_t (\delta\Gamma + \delta A) dt = 0. \quad (11)$$

Выражения вариаций кинетической энергии (9) и работы внешних сил (10) узла подставляем в (11), и получим следующую вариационную систему уравнений с соответствующими начальными условиями:

$$\begin{aligned} \int_t (\delta\Gamma + \delta A) dt = \int_t & \left\{ \left[ -M(\rho) \frac{\partial^2 u^0}{\partial t^2} + S_z(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_1^0}{\partial t^2} + S_y(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_2^0}{\partial t^2} + P_1 + q_1 \right] \delta u^0 + \right. \\ & + \left[ -M(\rho) \frac{\partial^2 v^0}{\partial t^2} - S_y(\rho) \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial t^2} + P_2 + q_2 \right] \delta v^0 + \left[ -M(\rho) \frac{\partial^2 w^0}{\partial t^2} + S_z(\rho) \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial t^2} + \right. \\ & + P_3 + q_3 \left. \right] \delta w^0 + \left[ S_z(\rho) \frac{\partial^2 u^0}{\partial t^2} - I_z(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_1^0}{\partial t^2} - I_{yz}(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_2^0}{\partial t^2} - M_z(P_1) - \right. \\ & - M_z(q_1) \left. \right] \delta \alpha_1^0 + \left[ S_y(\rho) \frac{\partial^2 u^0}{\partial t^2} - I_{yz}(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_1^0}{\partial t^2} - I_y(\rho) \frac{\partial^2 \alpha_2^0}{\partial t^2} - M_y(P_1) - \right. \\ & - M_y(q_1) \left. \right] \delta \alpha_2^0 + \left[ -S_y(\rho) \frac{\partial^2 v^0}{\partial t^2} + S_z(\rho) \frac{\partial^2 w^0}{\partial t^2} - I_p(\rho) \frac{\partial^2 \theta^0}{\partial t^2} + M(P_2, P_3) + \right. \\ & + M(q_2, q_3) \left. \right] \delta \theta^0 \left. \right\} dt + \left\{ \left[ M(\rho) \frac{\partial u^0}{\partial t} - S_z(\rho) \frac{\partial \alpha_1^0}{\partial t} - S_y(\rho) \frac{\partial \alpha_2^0}{\partial t} \right] \delta u^0 + \right. \\ & + \left[ M(\rho) \frac{\partial v^0}{\partial t} + S_y(\rho) \frac{\partial \theta^0}{\partial t} \right] \delta v^0 + \left[ M(\rho) \frac{\partial w^0}{\partial t} - S_z(\rho) \frac{\partial \theta^0}{\partial t} \right] \delta w^0 + \\ & + \left[ -S_z(\rho) \frac{\partial u^0}{\partial t} + I_z(\rho) \frac{\partial \alpha_1^0}{\partial t} + I_{yz}(\rho) \frac{\partial \alpha_2^0}{\partial t} \right] \delta \alpha_1^0 + \left[ -S_y(\rho) \frac{\partial u^0}{\partial t} + I_{yz}(\rho) \frac{\partial \alpha_1^0}{\partial t} + \right. \\ & \left. + I_y(\rho) \frac{\partial \alpha_2^0}{\partial t} \right] \delta \alpha_2^0 + \left[ S_y(\rho) \frac{\partial v^0}{\partial t} - S_z(\rho) \frac{\partial w^0}{\partial t} + I_p(\rho) \frac{\partial \theta^0}{\partial t} \right] \delta \theta^0 \left. \right\} = 0. \end{aligned}$$

В качестве численного метода решения поставленных задач будем использовать метод конечных элементов (МКЭ) по пространственным координатам и неявный метод конечных разностей (МКР) по времени.

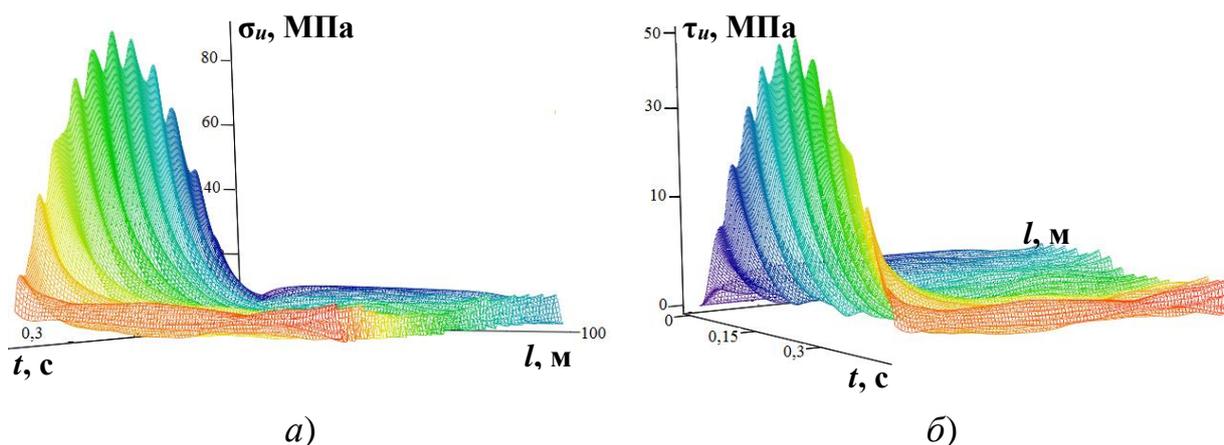
В третьей главе диссертации «**Анализ результатов плоско и пространственно расположенных прямолинейных подземных трубопроводов при пространственных сейсмических воздействиях**» проведены численные исследования результатов плоско- и пространственно расположенных подземных трубопроводов с различными граничными условиями. Определена реакция состыкованных подземных трубопроводов при пространственных сейсмических воздействиях. Показано, что когда сейсмическая волна воздействует на состыкованный трубопровод под углом

к его продольной оси, следует проводить вычисления по составной модели трубопровода, где учитываются каждая секция трубопровода и каждый его стык.

**Задача 1.** В качестве примера рассмотрим следующую задачу по пространственной схеме расчета: подземный трубопровод с заземленным левым концом и свободным правым концом.

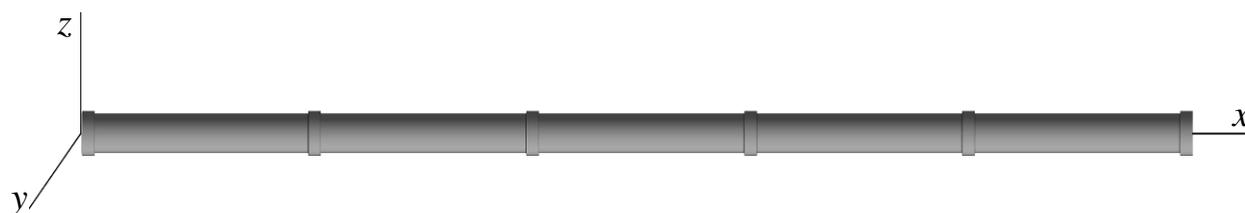
Механические и геометрические параметры выбираем в следующем виде:  $E=2 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho=7.8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $l=100$  м;  $D_H=0.5$  м;  $D_B=0.49$  м;  $\mu_{грунт}=0.2$ ;  $\mu_{труба}=0.3$ ;  $k_x=1.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=3.9 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $u_{0x}=u_0 \cdot \cos\alpha$ ;  $u_{0y}=u_0 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta$ ;  $u_{0z}=u_0 \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta$ ;  $u_0=a_0 \cdot e^{-\varepsilon(t-f(x,y,z)/C_p)} \cdot \sin\omega(t-f(x,y,z)/C_p) \cdot H(t-f(x,y,z)/C_p)$ ;  $a_0=0.004$  м;  $\varepsilon=0,3$  с<sup>-1</sup>;  $f(x,y,z) = \sqrt{(x \cdot \sin\alpha)^2 + (y \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta)^2 + (z \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta)^2}$ ;  $\omega=2\pi/T$ ;  $T=0.3$  с;  $C_p=1500$  м/с;  $\alpha=30^\circ$ ;  $\beta=60^\circ$ ;  $R_H=0.25$  м;  $\tilde{\gamma}=45^\circ$ .  $\alpha, \beta$ —углы падения сейсмической волны.

На рис.3 представлены трехмерные результаты вычисления интенсивностей нормальных (а) и касательных (б) напряжений трубопровода, изменяющихся по времени. Из рисунков видно, что максимальные напряжения в подземном трубопроводе возникают около заземленного конца.



**Рис.3. Изменения интенсивностей нормальных (а) и касательных (б) напряжений по времени и вдоль оси трубопровода**

Рассмотрим протяженный трубопровод со многими стыками, расположенный на плоскости  $Oxy$  и взаимодействующий с окружающим его грунтом по упрощенной упругой модели. Пусть длина подземного трубопровода равна 200 м, а длина каждой его секции составляет 5 м (рис.4).



**Рис.4. Состыкованный подземный трубопровод**

В частности, левый и правый торцы трубопровода закреплены в грунт, а сейсмическая волна задана в виде гармонической функции с углами падения  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$ .

Зависимости между усилиями, моментами и относительными перемещениями, поворотами торцов стыка на основе экспериментальных результатов было записано в виде

$$\begin{cases} N = K_N u, Q_1 = K_Q v, Q_2 = K_Q w, \\ M_{u_1} = K_{M_u} \alpha_1, M_{u_2} = K_{M_u} \alpha_2, M_k = K_{M_k} \theta, \end{cases} \quad (12)$$

где  $N$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $M_{u_1}$ ,  $M_{u_2}$ ,  $M_k$  – соответственно продольные и поперечные силы, изгибающие и крутящие моменты, вызывающие соответствующие относительные упругие перемещения  $u$ ,  $v$ ,  $w$  и относительные упругие углы поворотов  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\theta$  в стыке,  $K_N$ ,  $K_Q$ ,  $K_{M_u}$ ,  $K_{M_k}$  – коэффициенты жесткости стыка при соответствующих нагружениях.

Приведенная продольная жесткость трубы с учетом податливой стыковки  $B_{np}$ , при значительном числе стыковых соединений в трубопроводе, известными учеными была представлена следующей приближенной формулой, соответствующей статическому деформированию трубопровода:

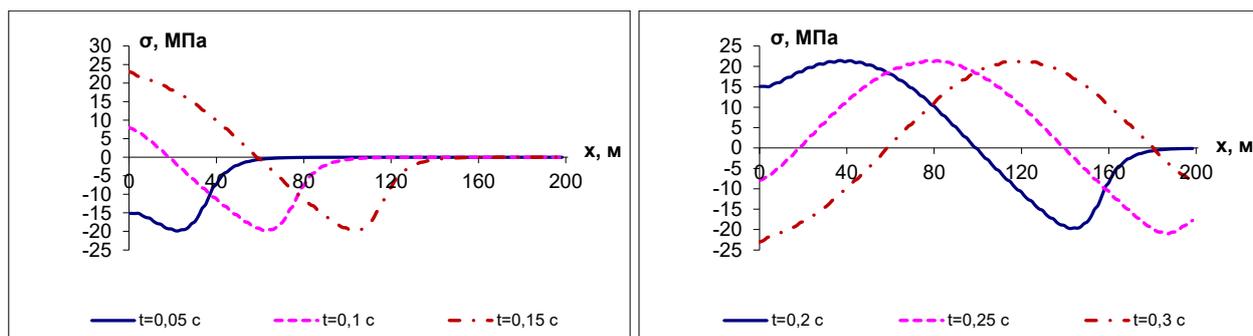
$$B_{np} = \frac{B}{1 + \frac{B}{K_N l_i}}, \quad (13)$$

где  $B = EF$  – жесткость на растяжение (сжатие);  $l_i$  – длина одной секции;  $K_N$  – продольная жесткость стыкового соединения.

**Задача 2.**  $E=1.2 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho=7.0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $l=200$  м; в прямолинейном участке  $k_x=1.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=3.9 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $u_{0x}=u_0 \cdot \cos \alpha$ ;  $u_{0y}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$ ;  $u_{0z}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$ ;  $u_0=a_0 \cdot \sin \omega(t-f(x,y,z)/C_p) \cdot H(t-f(x,y,z)/C_p)$ ;  $a_0=0.01$  м;  $\omega=2\pi/T$ ;  $f(x,y,z) = \sqrt{(x \cdot \sin \alpha)^2 + (y \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (z \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta)^2}$ ;  $T=0.3$  с;  $C_p=700$  м/с;  $\mu_{грунт}=0.2$ ;  $\mu_{труба}=0.3$ ;  $D_H=0.5$  м;  $D_B=0.49$  м. Амплитуда колебаний грунта  $a_0$  соответствует 9-балльному землетрясению по шкале MSK-64. Коэффициенты жесткости стыков  $K_N=80 \cdot 10^4$  кН/м;  $K_Q=200 \cdot 10^4$  кН/м;  $K_{M_u}=9 \cdot 10^2$  кНм;  $K_{M_k}=8 \cdot 10^4$  кНм.

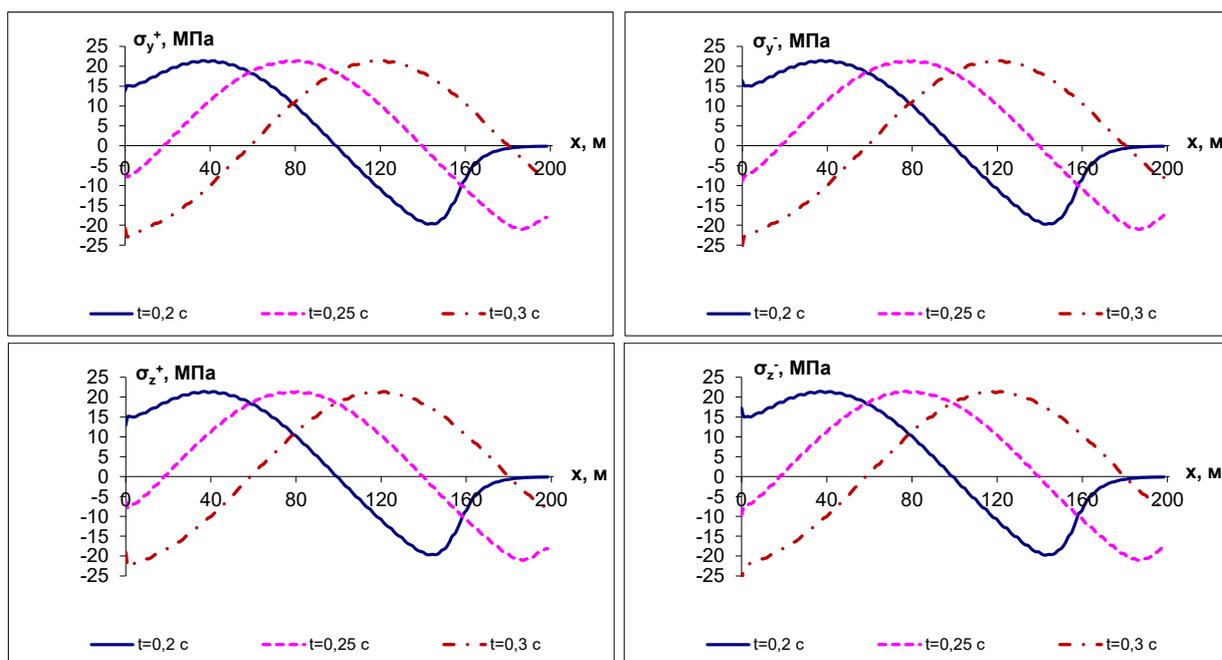
На рис.5 приведены изменения значений сжимающего (растягивающего) напряжения вдоль оси подземного трубопровода при фиксированных значениях времени.

Из результатов видно, что в каждом стыке сжимающее (растягивающее) напряжение подземного трубопровода по координате имеет значение, характерное для этого стыка с определенными мелкими всплесками. Это связано с отражением волны от стыка и прохождением волны через стык к соседней секции трубопровода.



**Рис.5. Изменения значений сжимающего (растягивающего) напряжения вдоль оси подземного трубопровода при фиксированных значениях времени**

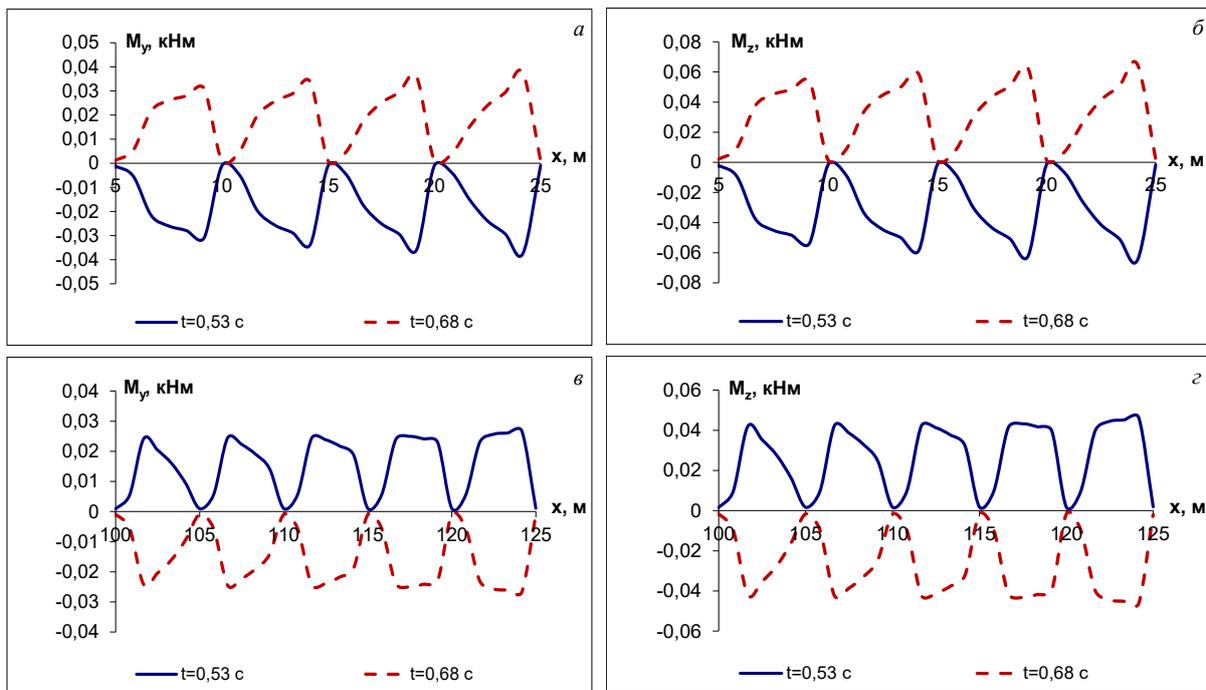
На рис.6 приведены изменения значений полных напряжений вдоль оси подземного трубопровода при фиксированных значениях времени. На этих графиках (рис.6) видно, что каждая секция на участках подземного трубопровода влияет на значения изгибающих моментов.



**Рис.6. Изменения значений полных напряжений ( $\sigma_y^+$ ,  $\sigma_y^-$ ,  $\sigma_z^+$ ,  $\sigma_z^-$ ) вдоль оси подземного трубопровода при фиксированных значениях времени**

Здесь тоже видно, что в каждом стыке значения полных напряжений подземного трубопровода по координате имеют разный характер с определенными мелкими всплесками за счет податливости стыков.

На рис.7 для наглядности приведено изменение значений изгибающих моментов ( $M_y$ ,  $M_z$ ) для разного диапазона длин ( $x=5-25$  м,  $x=100-125$  м и  $x=170-195$  м) подземного трубопровода при фиксированных значениях времени.



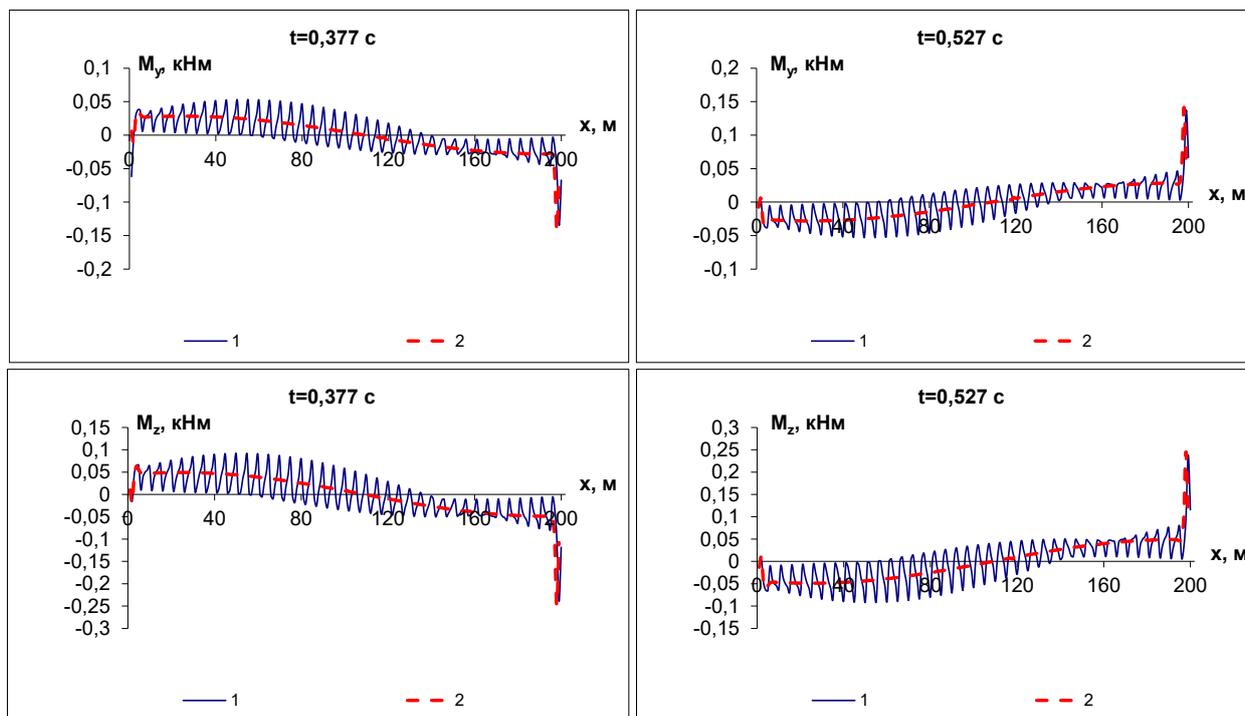
**Рис.7. Изменение значения изгибающего момента (изгиб относительно осей  $Oy$  и  $Oz$ ) разного сечения подземного трубопровода при фиксированных значениях времени**

Как установлено, по длине секции подземного трубопровода изгибающие моменты изменяются – увеличиваются, начиная от левого стыка, и затем уменьшаются до правого стыка (рис.7), а на стыке значения изгибающего момента меньше, чем на середине секции.

Стыки подземного трубопровода играют важную роль в формировании напряженно-деформированного состояния, так как в каждой секции подземного трубопровода полные напряжения изменяются, что связано с изгибными деформациями на секции.

На рис.8 представлены сравнительные графики изгибающих моментов, вычисленных по двум сравниваемым моделям. Как и следовало ожидать, графики моментов по длине трубопровода, вычисленные по модели однородного трубопровода с приведенной жесткостью, имеют гладкий вид.

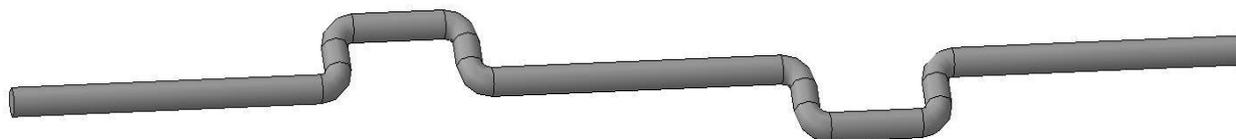
Графики моментов, вычисленные без перехода к приведенной жесткости, имеют сложный характер, что связано с динамическими процессами в контакте секций труб и их стыковых элементов. Из этих сравнений приходим к заключению, что когда сейсмическая волна воздействует на состыкованный трубопровод, под углом к его продольной оси следует проводить вычисления по составной модели трубопровода, где учитываются каждая секция трубопровода и каждый его стык.



**Рис.8. Изменение значения изгибающего момента вдоль оси подземного трубопровода при фиксированных значениях времени:  
1 – по формуле (12); 2 – по формуле (13)**

В четвертой главе диссертации «Сейсмодинамика подземных трубопроводов различной конфигурации при пространственных сейсмических воздействиях» рассмотрена сейсмодинамика подземных трубопроводов различной конфигурации при пространственных сейсмических воздействиях. Определено напряженно-деформированное состояние пространственно расположенных подземных трубопроводов сложной ортогональной конфигурации при разных углах падения сейсмической нагрузки. Решен ряд задач с анализом численных результатов сейсмодинамики подземных трубопроводов сложной ортогонально и неортогональной конфигураций.

Рассмотрим ортогональную систему трубопроводов, расположенную на плоскости  $Oxy$  и взаимодействующую с окружающим ее грунтом. Охарактеризуем подземный трубопровод длиной 180 м и два П-образных участка на плоскости  $Oxy$  с размерами в ширину 2 м и в длину 5 м (рис.9).



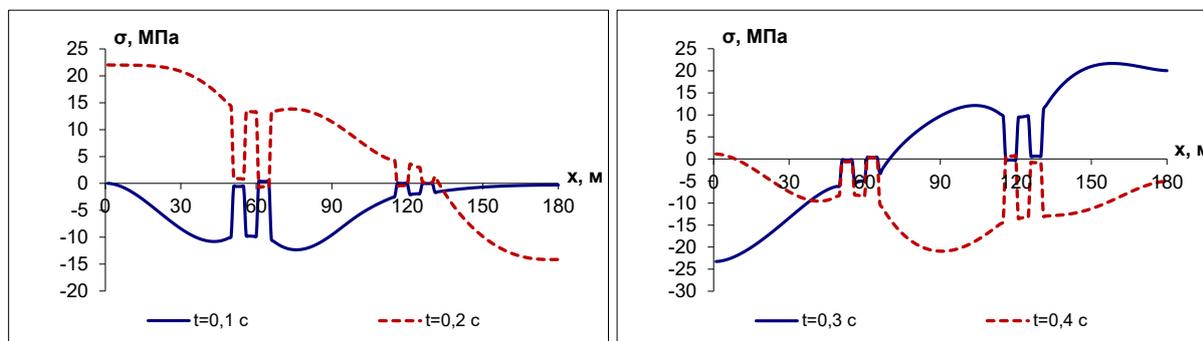
**Рис.9. Участок трубопровода сложной ортогональной конфигураций**

Пусть левый и правый торцы трубопровода закреплены в грунт, а сейсмическая волна задана в виде гармонической функции с углами падения

$\alpha=45^\circ$ ,  $\beta=30^\circ$ . В целом задача является нестационарной пространственной задачей для исследования процессов в подземных трубопроводах при действии сейсмических волн.

**Задача 3.** Механические и геометрические параметры подземного трубопровода и грунта выбираем в следующем виде:  $E=2 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho=7.8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; на прямолинейном участке  $k_x=1.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=3.9 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>; на сложном участке  $k_x=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=1.3 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $u_0=a_0 \cdot \sin \omega(t-f(x,y,z)/C_p) \cdot H(t-f(x,y,z)/C_p)$ ;  $a_0=0.008$  м;  $\omega=2\pi/T$ ;  $T=0.3$  с;  $f(x,y,z) = \sqrt{(x \cdot \sin \alpha)^2 + (y \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta)^2 + (z \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta)^2}$ ;  $C_p=700$  м/с;  $l=180$  м;  $u_{0x}=u_0 \cdot \cos \alpha$ ;  $u_{0y}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$ ;  $u_{0z}=u_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$ ;  $\mu_{грунт}=0.2$ ;  $\mu_{труба}=0.3$ ;  $D_H=0.5$  м;  $D_B=0.49$  м. Тогда максимальное значение ускорения заданной волны равно  $3.50$  м/с<sup>2</sup>, что соответствует 9-балльному землетрясению по шкале MSK-64.

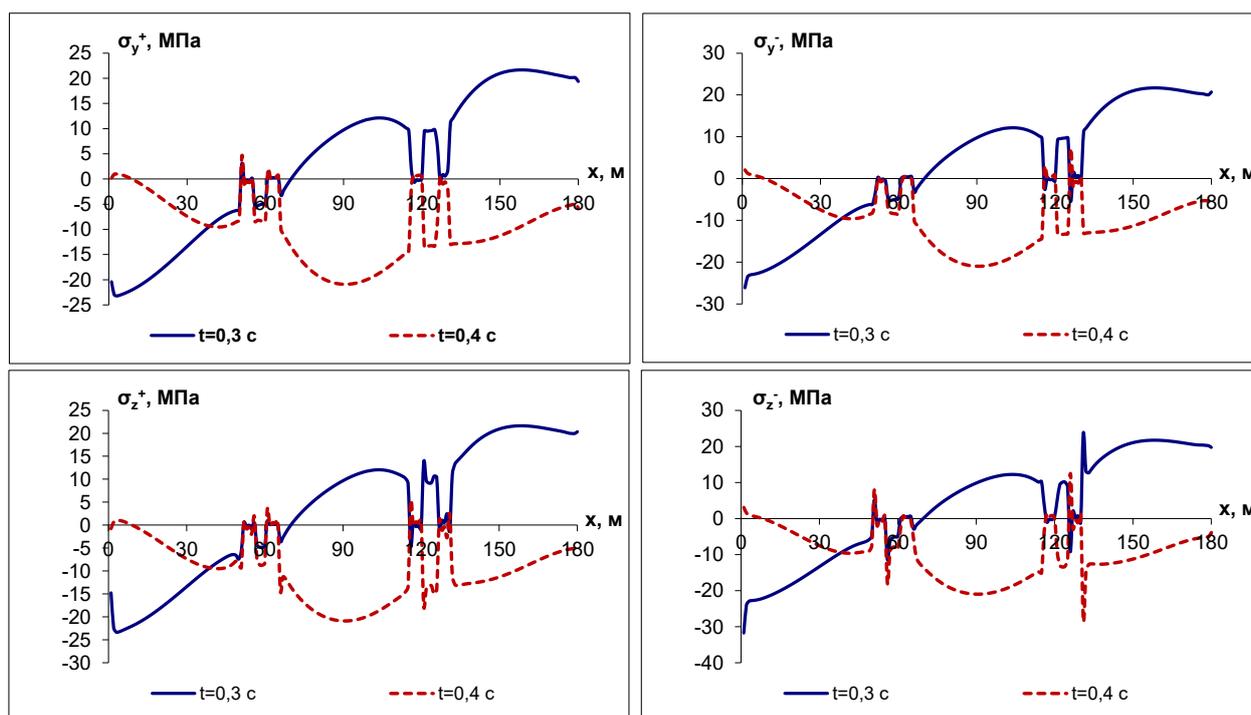
Приведем результаты расчетов. На рис.10 приведены напряжения в трубопроводе с наличием П-образного участка при воздействии гармонической волны. Форму волны в трубопроводе определяет форма волны в окружающем его грунте. Как продольная, так и изгибная формы волн в трубопроводе будут похожи соответствующим формам волн в грунте, если «кажущаяся» скорость распространения волны в грунте меньше, чем скорость распространения волны в трубопроводе. Возмущения в трубопроводе вне области существования волны в грунте быстро затухают за счет излучения энергии волны в окружающий грунт.



**Рис.10. Изменения значений сжимающего (растягивающего) напряжения вдоль оси подземного трубопровода при фиксированном времени**

Из рис.10 видно, что наличие П-образного участка уменьшает значения осевого напряжения до расстояния 20–30 м около этого участка.

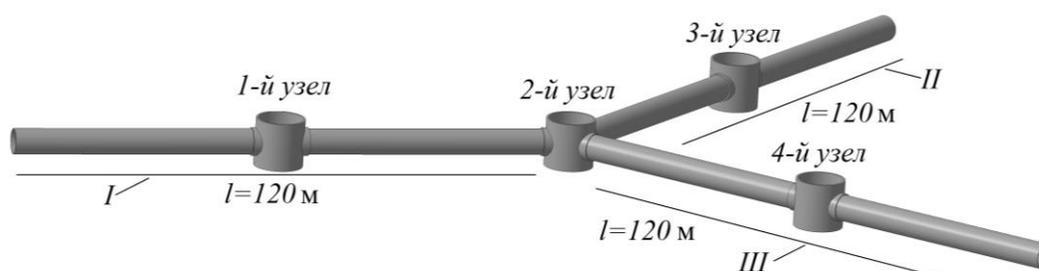
Однако, суммарное напряжение от осевой силы и момента силы в некоторых случаях может быть больше только на П-образном участке (рис.11). Наличие компенсатора П-образной формы нарушает дальнейшее формирование волны в трубопроводе и из-за этого за этим участком волна в трубопроводе начинает формироваться заново. При действии гармонической волны рассматриваемый динамический процесс выходит на стационарный режим, начиная со второго периода колебаний.



**Рис.11. Изменения значений полных напряжений ( $\sigma_y^+$ ,  $\sigma_y^-$ ,  $\sigma_z^+$ ,  $\sigma_z^-$ ) вдоль оси подземного трубопровода при фиксированных временах**

В пятой главе диссертации «Исследование сейсродинамики подземных трубопроводных систем сложной конфигурации на действие набора реальных записей землетрясений» рассмотрена сейсродинамика подземных трубопроводных систем сложной конфигурации на действие набора реальных записей землетрясений. Определено напряженно-деформированное состояние подземных трубопроводов сложной ортогонально и неортогональной конфигураций на основе реальных записей землетрясений.

Рассмотрим неортогонально соединенную сложную систему подземных трубопроводов. На рис.12 приведена система трубопроводов и колодцев неортогональной конфигурации. Колодцы моделируются как твердое тело, жестко соединенное с трубопроводами и взаимодействующее с грунтом.

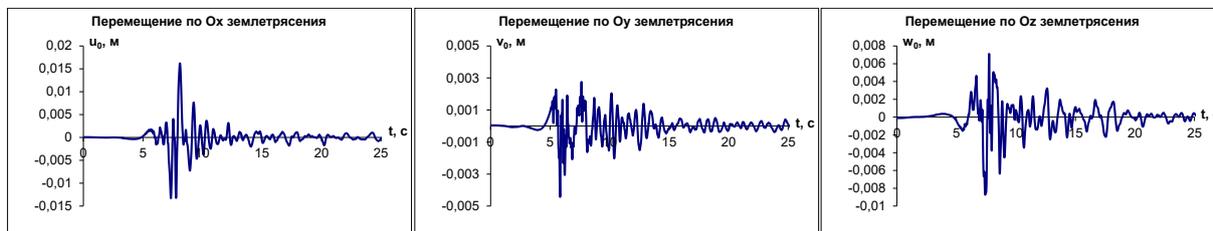


**Рис.12. Участок сложных систем подземных трубопроводов I, II, III**

Колодцы имеют цилиндрическую форму, в соответствии с которой вычисляются массовые моменты инерции и коэффициенты взаимодействия с грунтом. Пусть подземный трубопровод имеет 4 узла с колодцами в середине

линейных участков и в точке соединения этих трех линейных участков (рис.12). При дискретизации по координате трубопровода эти узлы имеют номера 61, 121, 181 и 302.

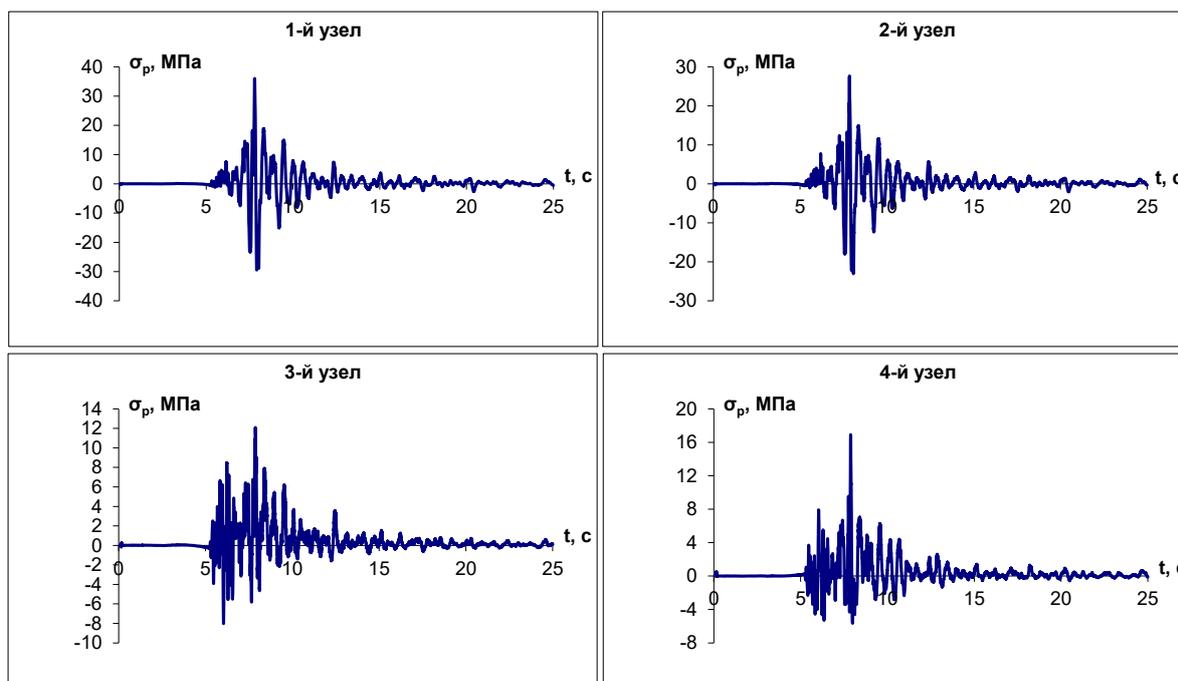
Предположим, что торцы трубопровода закреплены в грунт. Рассмотрим действие трехкомпонентной волны реальной записи землетрясения, происшедшей 13 мая 2002 г. в Глории (США), которое показано на рис.13.



**Рис.13. Оцифрованные записи сейсмограмм землетрясения 13 мая 2002 г. в Глории (США)**

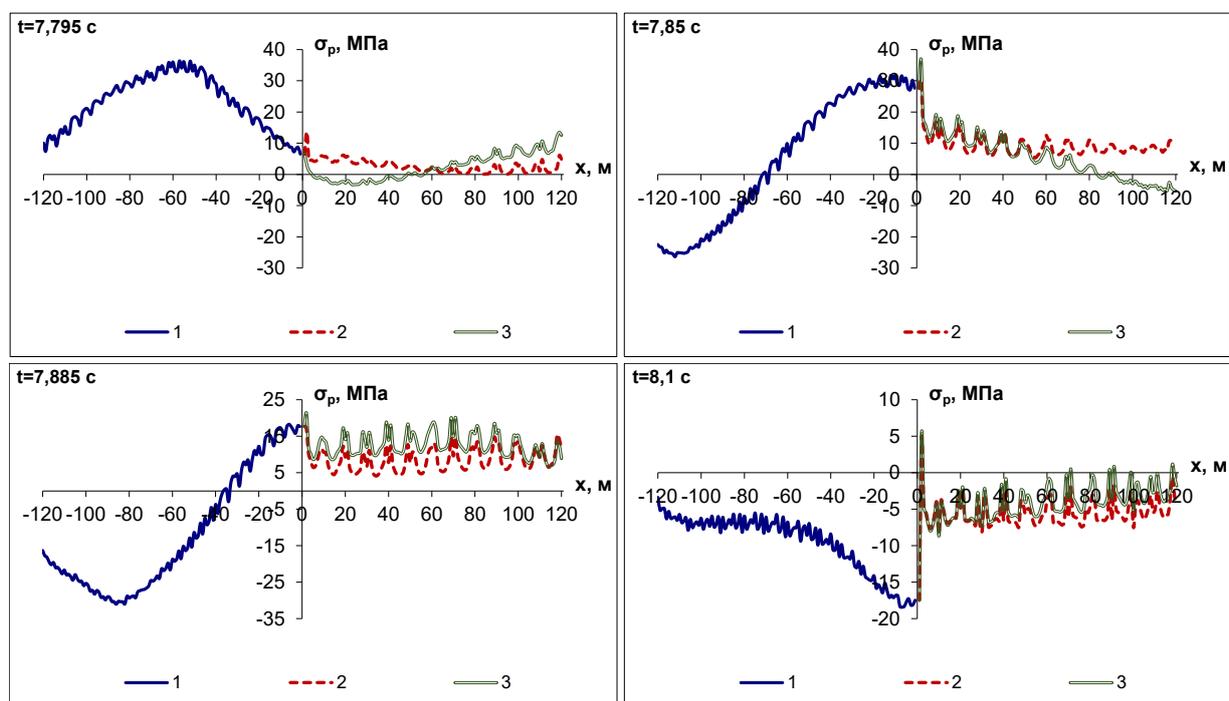
**Задача 4.** В качестве примера рассмотрим задачу со следующими исходными данными: механические и геометрические параметры подземного трубопровода и грунта имеют значения:  $E=2 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho=7.8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $D_H=0.5$  м;  $D_B=0.49$  м;  $k_x=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}=1.3 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $C_p=1000$  м/с. Направление распространения сейсмической волны совпадает с осью первой трубы. Для колодца:  $E=2.5 \cdot 10^4$  МПа;  $\rho=2.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $D_H^{uz}=1$  м;  $D_B^{uz}=0.9$  м;  $H_{uz}=1$  м;  $k_x^{uz}=0.5 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_{y,z}^{uz}=1.3 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup> для учета массы данного жесткого узла и его взаимодействия с грунтом.

На рис.14 представлены изменения значений полных напряжений по времени возле узлов подземного трубопровода.



**Рис.14. Изменения полных напряжений по времени возле узлов подземного трубопровода**

В формировании полного напряжения подземного трубопровода также основную роль играет изгибающий момент. Значения полных напряжений подземного трубопровода увеличиваются за счет значений изгибающих моментов.



**Рис.15. Изменения значений полных напряжений вдоль оси каждого линейного участка подземных трубопроводов I(1), II(2), III(3) при фиксированном времени**

На рис.15 приведены изменения значений полных напряжений вдоль оси подземного трубопровода при фиксированном времени.

Максимальные значения полных напряжений подземных трубопроводных систем достигается в центре около сложного узла (рис.15,  $t=7.85$  с и  $t=8.1$  с). Различие графиков напряжений по второму и третьему трубопроводам связано с их расположением.

Из рис.15 видно, что одним из источников природных угроз для сложных систем подземных трубопроводов являются землетрясения большой интенсивности, вызывающие резкие колебания грунта и наносящие серьезные повреждения сложным подземным трубопроводам.

Последствия Ташкентского землетрясения также показывают, что повреждения и разрушения подземных трубопроводов происходят на участках ортогонального и неортогонального соединений. Из полученных результатов видны хорошие совпадения с фактическими данными последствий землетрясений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённых исследований по диссертации доктора наук (DSc) на тему «Развитие методов сейсродинамики подземных пространственных трубопроводных систем» сформулированы следующие выводы:

1. Разработаны методика и численный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния продольных колебаний прямолинейных и сложных подземных трубопроводов с узловыми соединениями при сейсмических воздействиях (гармонической, затухающей гармонической, импульсной). Проведены расчеты с учетом грунтовых условий, в том числе учитывающие глубину заложения, геометрию, закрепление концов трубопроводов.

2. Выведены обобщенные системы дифференциальных уравнений пространственных колебаний подземного трубопровода и сложного узла как абсолютно твердого тела при произвольных сейсмических воздействиях на основе вариационного принципа Гамильтона–Остроградского. Полученные системы уравнений позволяют в общем виде рассматривать класс задач.

3. Разработаны вычислительные алгоритмы и комплекс программ по расчету напряженно-деформированного состояния пространственно расположенных подземных трубопроводов различных конфигураций при произвольном направлении сейсмического воздействия трехкомпонентных записей реальных землетрясений.

4. Получен ряд численных результатов в зависимости от угла падения сейсмической нагрузки. Результаты численных экспериментов на основе принятой в расчетах гипотезы о силах взаимодействия между протяженными подземными сооружениями (трубопроводом) и грунтом показали приемлемые совпадения с фактическими данными, полученными из анализа последствий землетрясений.

5. Проведенные теоретические и вычислительно-экспериментальные исследования решают проблемы оценки напряженно-деформированного состояния пространственно расположенных подземных трубопроводов ортогональной и неортогональной конфигураций при сейсмических воздействиях. Анализ результатов подтвердило, что напряженно-деформируемое состояние различных конфигураций подземного трубопровода зависит от углов падения сейсмической волны.

6. Определены опасные точки возникновения максимальных напряжений ортогональной и неортогональной конфигураций подземных трубопроводов на основе реальных записей землетрясений. Сделан вывод, что наличие компенсаторов в целом приводит к снижению осевых напряжений вблизи этих компенсаторов до расстояния 20–30 м.

7. Решены новые задачи сейсродинамики подземных трубопроводов при вязкоупругих взаимодействиях с узловым соединением ортогональной и неортогональной конфигураций на действие набора реальных записей землетрясений. В рассмотренных примерах разница между результатами

упругих и вязкоупругих решений составляет 15 – 20%. Учет вязкости грунта увеличивает обмен энергией между грунтом и подземным трубопроводом.

8. Расчет подземного сооружения при воздействии зафиксированных реальных сейсмограмм учитывает все особенности сейсмического процесса, содержащиеся в сейсмограммах, и поэтому более объективно характеризует поведение сооружения при сейсмическом воздействии, предоставляет возможность вычислить напряжения, близкие к истинным, в теле исследуемого объекта. Это позволяет проводить более точные вычисления максимальных напряжений в подземном трубопроводе и сделать более надежный вывод о сейсмостойкости конкретного трубопровода для грунтовых условий на площадке строительства.

9. Результаты диссертационной работы использованы при подготовке актуализированной версии нормативного документа КМК 2.01.03-19 «Строительство в сейсмических районах» раздела IV «Подземные сооружения и инженерные сети» (Приказ Министра строительства Республики Узбекистан 480 от 15 октября 2019 г.).

10. Полученные результаты, в частности, использованы при проектировании подземных трубопроводов (объект «Питьевая вода и канализационные сети», Наманганская область), что способствовало повышению качества и эффективности работ, сократило время расчетов в 2–3 раза, обеспечило устойчивость и запас прочности этих сооружений в 1.2 раза. Полученные результаты дают возможность уменьшить глубину заложения трубопроводов на 15–20% с учетом сейсмической интенсивности строительной площадки (Справка Министерства строительства Республики Узбекистан №09-06/6406 от 19 августа 2020 г.).

Автор считает своим долгом выразить благодарность своему научному консультанту академику АН РУз, д.т.н., профессору Г.Р. Рашидову за постановку темы диссертации, ценные консультации и оказанную помощь при выполнении исследования, обсуждение и внедрение результатов, а также д.т.н. Г. Юлдашеву и д.ф.-м.н., профессору И. Мирзаеву за консультации по вопросам алгоритмизации решения класса задач и разработки универсальных прикладных программ, которые позволили ускорить получение результатов по оценке напряженно-деформированного состояния подземных систем жизнеобеспечения.

**ONE-TIME SCIENTIFIC COUNCIL DSc.18/30.12.2019.T.09.01  
ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE TASHKENT STATE  
TRANSPORT UNIVERSITY**

---

**INSTITUTE OF MECHANICS AND SEISMIC STABILITY OF  
STRUCTURES**

**BEKMIRZAEV DIYORBЕК ABDUGAPPOROVICH**

**DEVELOPMENT OF SEISMODYNAMICS METHODS OF  
UNDERGROUND SPATIAL PIPELINE SYSTEMS**

**05.09.02 – Basements, foundations and underground structures.  
Bridges and transport tunnels. Roads, subways  
01.02.04 – Mechanics of Deformable Rigid Bodies**

**DISSERTATION ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc)  
ON TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2021**

**The subject of doctoral dissertation is registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan № B2021.2.DSc/T331.**

The doctoral dissertation has been prepared in the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is placed on web-page of Scientific Council at the address (www.tstu.uz) and information-educational portal “ZiyoNet” at the address (www.ziyo.net.uz).

**Scientific adviser:** **Rashidov Tursunbay**  
doctor of technical sciences, professor, academician

**Official opponents:**

**Rasulov Khayat Zayirovich**  
doctor of technical sciences, professor

**Khusanov Bakhtiyar Ergashbaevich**  
doctor of physical and mathematical sciences, senior scientific researcher

**Miralimov Mirzakhid Khamitovich**  
doctor of technical sciences

**Leading organization:** **Ferghana Polytechnic Institute**

The defense will take place on “25” June 2021 at 9<sup>00</sup> at the meeting of the One-time Scientific Council based on the Scientific Council DSc.18/30.12.2019.T.09.01 at the Tashkent State Transport University. (Address: 100167, Tashkent, str. Temiryo'lchilar, 1. Tel/fax: (+99871) 299-00-01, e-mail: rektorat(@tstu.uz, tashiit@exat.uz).

The doctoral dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of the Tashkent State Transport University (is registered number No. 024). Address: 100167, Tashkent, str. Temiryo'lchilar, 1. Tel/fax: (+99871) 299-00-01.

Abstract of dissertation sent out on “12” June 2021 year.  
(mailing report № 1 on “22” May 2021 year).



**A.A. Riskulov**  
Chairman of the scientific council  
awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

**N.A. Nishonov**  
Scientific secretary of scientific council  
awarding scientific degrees,  
doctor of philosophy, s.s.r

**A.A. Ishankhodzhaev**  
Chairman of the academic seminar under  
scientific council awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

## INTRODUCTION (abstract of doctoral (DSc) dissertation)

**The aim of the study** is to develop seismodynamics methods of underground spatial pipeline systems of complex configuration under an arbitrary direction of seismic impacts, including the ones based on real earthquake records.

**Research objectives:**

to develop a methodology and numerical algorithms for solving problems of longitudinal vibrations of straight and complex systems of underground pipelines under seismic influences (harmonic, damped harmonic, impulse ones);

to develop mechanical and mathematical models of underground pipeline systems under an arbitrary direction of seismic loading based on the Hamilton – Ostrogradsky variational principle (general formulation);

to develop a method for numerical calculation of the stress-strain state of joint underground pipelines under an arbitrarily directed seismic loading;

to develop a methodology for solving problems of seismodynamics of underground pipelines of orthogonal and non-orthogonal configurations;

to develop a method for determining the stress-strain state of underground pipelines with nodal connections of orthogonal and non-orthogonal configurations based on real earthquake records;

to create a complex of software for personal computers to solve the class of the considered problems of seismodynamics of underground pipelines and obtain the corresponding certificates for it;

to carry out multivariate computational experiments to study the dynamics of underground pipelines of various configurations under various seismic loads based on real earthquake records for practical application.

**The object of research** is a plane and spatially located underground pipeline system of various configurations (water pipelines, gas and oil pipelines, etc.) located in the seismic zones of the republic.

**The scientific novelty of the dissertation research** is as follows:

the methods and numerical algorithms for solving problems of seismodynamics of longitudinal vibrations of straight and complex systems of underground pipelines under seismic influences (harmonic, damped harmonic, impulse ones) were improved;

a generalized system of differential equations of spatial vibrations of an underground pipeline and a complex unit, as an absolutely rigid body, under arbitrary seismic influences, was developed on the basis of the Hamilton – Ostrogradsky variational principle;

a method for solving new problems of seismodynamics of joint underground pipelines under an arbitrary direction of seismic loading was developed;

a new computational algorithm based on finite element and finite difference methods was developed for solving problems of seismodynamics of underground spatial pipeline systems of orthogonal and non-orthogonal configurations;

a method was developed, for the first time for seismodynamics problems, to determine the stress-strain state of underground pipelines with a nodal connection of orthogonal and non-orthogonal configurations based on real earthquake records.

**Implementation of research results.** Based on the scientific results obtained of the study of the seismodynamics processes in spatial systems of underground pipelines the following aspects were implemented:

the developed program for the calculation of underground structures and engineering networks in seismic areas on the basis of building codes KMK 2.01.03-96 “Construction in seismic areas” was used in the calculation of the projecting objects “ToshuyjoyLITI”, “O'ZBEKKOMMUNAL-LOYIHAQURILISH” and “QISHLOQQURILISHLOYIHA” of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan (Certificate of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan No. 09-06/6406 dated August 19, 2020) The use of scientific results allows saving resources, improving the quality of work and reducing the calculation time by 2-3 times during the process of projecting;

practical calculations according to the improved method for determining the stress-strain state of spatial systems of underground pipelines under seismic loads were introduced and used in “ToshuyjoyLITI” when revising and supplementing the normative document KMK 2.01.03-96 “Construction in seismic regions” Section IV “Underground structures and engineering network” (Certificate of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan No. 09-06/6406 dated August 19, 2020). The implementation of scientific results will prevent damage and destruction of underground pipelines, and, from an economic point of view, will reduce costs in case of accidents and construction-and-installation work in emergencies.

The method for determining the effect of underground pipelines wells on seismic resistance and assessing the stress-strain state of pipelines connected to wells was used in the revision of Section IV “Underground structures and engineering networks” of the KMK regulatory document 2.01.03-96 “Construction in seismic regions”, with revisions and additions submitted to the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan for practical use (Certificate of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan dated August 19, 2020 No. 09-06-6406). The implementation of scientific results will increase the seismic resistance of underground structures and mitigate the consequences of possible strong earthquakes.

The developed method for calculating the seismic resistance of spatial underground pipeline systems under an arbitrary direction of seismic loads was introduced into the process of calculating and designing underground pipelines at the enterprises of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan PE “KELAJAK-S” (Certificate of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan No. 09-06/6406 dated August 19, 2020.). The application of the research results in the design process helped to reduce the calculation time by 2–3 times, ensure the stability and safety factor of the object by 1.2 times. The introduction of the scientific result made it possible to reduce the depth of pipelines by 15–20%, taking into account the seismic intensity of the construction site.

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references and 5 appendices. The volume of the dissertation is 197 pages.

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

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Бекмирзаев Д.А. Численный метод решения сейсмодинамики подземных трубопроводов. – Т.: «Fan va texnologiya», 2018, –148 с.

2. Бекмирзаев Д.А., Рашидов Т.Р. Решение задачи сейсмодинамики подземных трубопроводов при нагружениях произвольного направления // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2014. – №3-4. – С. 8–13. (05.00.00; №6).

3. Рашидов Т.Р., Бекмирзаев Д.А. Ер ости қувурининг сеймик қуч таъсирида тебраниши // Проблемы архитектуры и строительства. – Самарканд, 2014. – № 3. – С. 77–81. (05.00.00; №14).

4. Бекмирзаев Д.А. Практические задачи сейсмодинамики подземных трубопроводов // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2015. – №1. С. 15–19. (05.00.00; №6).

5. Бекмирзаев Д.А., Рашидов Т.Р. Математические модели и решение задачи сейсмодинамики подземных трубопроводов // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. Vol. 8. – Siberian, 2015. Issue 8. – Pp. 1046–1055. (05.00.00; №1).

6. Rashidov T.R., Bekmirzaev D.A. Seismodynamics of pipelines interacting with the soil // Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 52. – New York, 2015. Issue 3. – Pp. 149–154. (№3. Scopus. IF=0.9).

7. Рашидов Т.Р., Бекмирзаев Д.А. Сеймик қучлар таъсирида ер ости қувурида ҳосил бўладиган қучланишларнинг таҳлили // «Механика муаммолари» Ўзбекистон журнали. – Тошкент, 2015. – №3-4. – Б. 8–11. (05.00.00; №6).

8. Рашидов Т.Р., Юлдашев Т., Бекмирзаев Д.А. Ер ости қувурлари сейсмодинамикаси масалаларини сонли таҳлили // ТошТЙМИ Ахбороти. – Тошкент, 2015. – №1. –Б. 36–42. (05.00.00; №11).

9. Бекмирзаев Д.А. Исследование сейсмодинамики подземных трубопроводов сложной неортогональной конфигураций // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2016. – №3. – С. 21–24. (05.00.00; №6).

10. Рашидов Т.Р., Юлдашев Т., Бекмирзаев Д.А. К проблеме математического моделирования задач сейсмодинамики подземных трубопроводов // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2016. – №3. – С. 126–131. (05.00.00; №6).

11. Rashidov T.R., Bekmirzaev D.A. Longitudinal oscillations of underground pipelines at linear and non-linear interaction in the system «pipe-soil» // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2017. – №2-3. – С. 108–111. (05.00.00; №6).

12. Рашидов Т.Р., Бекмирзаев Д.А. Сейсмодинамика подземных трубопроводов ортогональной конфигурации при произвольном сейсмическом нагружении // *Узбекский журнал «Проблемы механики»*. – Ташкент, 2017. – №4. – С. 11–14. (05.00.00; №6).

13. Rashidov T.R., Yuldashev T., Bekmirzaev D.A. Seismodynamics of underground pipelines with arbitrary direction of seismic loading // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 55. – New York, 2018. Issue 4. – Pp. 243–247. (№3. Scopus. IF=0.9).

14. Бекмирзаев Д.А. Влияние силы инерции в задачах подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях // *Узбекский журнал «Проблемы механики»*. – Ташкент, 2018. – №2. – С. 7–10. (05.00.00; №6).

15. Бекмирзаев Д.А., Нишонов Н.А. Оценка влияния силы инерции на НДС подземных трубопроводов при сейсмическом воздействии // *Проблемы архитектуры и строительства*. – Самарканд, 2018. – № 3. – С. 159–163. (05.00.00; №14).

16. Бекмирзаев Д.А. Сейсмодинамика подземных трубопроводов сложной неортогональной конфигурации при воздействии пространственной сейсмической нагрузки // *Узбекский журнал «Проблемы механики»*. – Ташкент, 2019. – №4. – С. 11–14. (05.00.00; №6).

17. Bekmirzaev D.A., Mirzaev I. Dynamic processes in underground pipelines of complex orthogonal configuration at different incidence angles of seismic effect // *International Journal of Scientific & Technology Research*. Vol. 9. – India, 2020. Issue 4. – Pp. 2449–2453. (№3. Scopus. IF=0.4).

18. Bekmirzaev D.A., Mirzaev I. Earthquake Resistance Assessment of Buried Pipelines of Complex Configuration Based on Records of Real Earthquakes // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 57. – New York, 2021. Issue 6. – Pp. 491–496. (№3. Scopus. IF=0.9).

## **II бўлим (II часть; II part)**

19. Рашидов Т.Р., Бекмирзаев Д.А. CUPASL-программа для расчета подземных трубопроводов при воздействии произвольных сейсмических нагрузок // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство № DGU 03283. 24.07.2015 г.

20. Бекмирзаев Д.А. Расчет напряженно-деформированного состояния подземного трубопровода ортогональной конфигурации при воздействии сейсмической нагрузки // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство № DGU 03649. 11.04.2016 г.

21. Бекмирзаев Д.А. Программа для решения динамической и квазистатической задачи подземного трубопровода с узловым соединением // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство № DGU 05546. 03.08.2018 г.

22. Мирзаев И., Бекмирзаев Д.А. Комплекс программ для исследования сейсмодинамики пространственных систем подземных трубопроводов //

Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство № DGU 05586. 17.08.2018 г.

23. Бекмирзаев Д.А. Программа для расчета подземных сооружений и инженерных сетей в сейсмических районах на основе строительных норм и правил КМК 2.01.03-96 «Строительство в сейсмических районах» // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство № DGU 06598. 17.06.2019 г.

24. Bekmirzaev D.A. Design of Underground Pipelines under Arbitrary Seismic Loading // Open Journal of Applied Sciences. Vol. 5. USA, 2015. № 5. –Рр. 226–232.

25. Рашидов Т.Р., Бекмирзаев Д.А. Математические модели, алгоритмы решения задач сейсродинамики подземных трубопроводов // «Информатика: проблемы, методология, технологии». XV Международной конференции. 12–13 февраля 2015 г. – Воронеж, 2015. – С. 148 – 152.

26. Рашидов Т.Р., Юлдашев Т., Бекмирзаев Д.А., Нишонов Н.А. Проблемы математического моделирования задач сейсродинамики подземных трубопроводов // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела. Материалы VIII Международного научного симпозиума. 9–11 декабря 2015 г. – Тверь, 2015. – С. 66–74.

27. Рашидов Т.Р., Бекмирзаев Д.А. Сейсродинамика подземных трубопроводов при нелинейном взаимодействии в системе «труба–грунт» // ВЕСТНИК КаздорНИИ. – Алматы, 2017. – № 1-2 (53-54). – С. 33–37.

28. Рашидов Т.Р., Мирзаев И., Юлдашев Т., Бекмирзаев Д.А. Численное решение задач сейсродинамики пространственной системы подземных трубопроводов // Вестник международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. Бишкек, 2018. – № 1/2018 (2). – С. 131-136.

29. Бекмирзаев Д.А. Совершенствование метода расчета сейсродинамики подземных трубопроводов // Вестник молодых ученых. – Ташкент, 2018. – № 1 (2). – С. 10–18.

30. Рашидов Т.Р., Мирзаев И., Бекмирзаев Д.А. Сейсродинамика пространственной системы подземных трубопроводов на основе реальных записей землетрясений // «Перспективы интенсивного подхода к инновационному развитию». Сборник материалов международной конференции. – Наманган, 2018. I-қисм. –Б. 197-201.

31. Бекмирзаев Д.А. Напряженно-деформированное состояние подземных трубопроводов ортогональной конфигурации при произвольном сейсмическом нагружении // «Роль науки в развитии социума: теоретические и практические аспекты». Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 160-163.

32. Бекмирзаев Д.А. Продольные колебания подземных сооружений при нелинейном взаимодействии с грунтом // «XXI век – век интеллектуальной молодёжи». Труды республиканской научной и научно-технической конференции. – Ташкент, 2018. – С. 48-51.

33. Бекмирзаев Д.А. Математическое моделирование задачи сейсродинамики сложных систем подземных трубопроводов // «GLOBAL SCIENCE AND INNOVATIONS 2019: CENTRAL ASIA». V-ая Международной научно-практической конференции. – Астана, 2019. – С. 221-225.

34. Мирзаев И., Бекмирзаев Д.А. Исследование влияние массы сложного узла подземных трубопроводов на действие реальных записей землетрясений // Прикладные и фундаментальные проблемы естественных наук. Республиканской научно-практической конференции. – Ташкент, 2019. – С. 214-217.

35. Мирзаев И., Бекмирзаев Д.А. Численное решение задач сейсродинамики пространственных систем подземных трубопроводов // Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий. Международной конференции. – Ташкент, 2019. – С. 88.

Автореферат «Механика муаммолари» Ўзбекистон журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус тилларидаги матнларининг мослиги текширилди (20.05.2021 й.).

Босишга рухсат этилди: 11.06.2021 йил.  
Бичими 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи: 3,9. Адади 100. Буюртма № 60.  
Тел (99) 832 99 79; (97) 815 44 54.  
Гувоҳнома reestr № 10-3279  
“IMPRESS MEDIA” МЧЖ босмаҳонасида чоп этилган.  
100031, Тошкент ш., Яккасарой тумани, Қушбеги кўчаси, 6-уй.