

**BUXORO MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**MUHAMMAD AL-XORAZMIY NOMIDAGI TOSHKENT AXBOROT
TEXNOLOGIYALARI UNIVERSITETI QARSHI FILIALI**

SAIPNAZAROV JONIBEK MUXAMMADIYEVICH

**KOSSERA MUHITIDAN IBORAT TO‘LQIN O‘TKAZGICHLARDA
GARMONIK TO‘LQINLARNI TARQALISH XUSUSIYATLARI**

01.02.04–Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on physical-
mathematical sciences**

Saipnazarov Jonibek Muxammadiyevich

Kossera muhitidan iborat to'liqin o'tkazgichlarda garmonik to'liqlarni
tarqalish xususiyatlari..... 3

Саипназаров Жонибек Мухаммадиевич

Особенности распространения гармонических волн в волноводах,
состоящих из среды Коссера..... 19

Saipnazarov Jonibek Mukhammadievich

Features of the propagation of harmonic waves in waveguides consisting of
a Cossera medium..... 37

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 41

**BUXORO MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**MUHAMMAD AL-XORAZMIY NOMIDAGI TOSHKENT AXBOROT
TEXNOLOGIYALARI UNIVERSITETI QARSHI FILIALI**

SAIPNAZAROV JONIBEK MUXAMMADIYEVICH

**KOSSERA MUHITIDAN IBORAT TO‘LQIN O‘TKAZGICHLARDA
GARMONIK TO‘LQINLARNI TARQALISH XUSUSIYATLARI**

01.02.04–Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Buxoro – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.2.PhD/FM881 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti Qarshi filialida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Buxoro muhandislik-texnologiya institut veb-saytida (www.bmti.uz) va "ZiyoNet" Axborot ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar :	Safarov Ismoil Ibroximovich fizika-matematika fanlari doktori, professor
Rasmiy opponentlar:	Mardonov Botir Mardonovich fizika-matematika fanlari doktori, professor Mirzayev Ibraxim fizika-matematika fanlari doktori, professor
Yetakchi tashkilot:	Namangan muhandislik-qurilish instituti

Dissertatsiya himoyasi 2025 yil 5 aprel kuni soat 09⁰⁰ da Buxoro muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 raqamli Ilmiy kengash majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100118, Buxoro shahar, Qayum Murtazoyev ko'chasi 15 uy. Tel.: (+998-65) 223-78-84; faks: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz).

Dissertatsiya bilan Buxoro muhandislik-texnologiya institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ 459 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100118, Buxoro shahar, Qayum Murtazoyev ko'chasi 15 uy. Tel.: (+99865) 223-78-84).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil 14 mart kuni tarqatildi.

(2024 yil 4 dekabr № 10 raqamli reyestr bayonnomasi).



M.X. Teshayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, fizika-matematika fanlari doktori (DSc)

Z.I. Boltayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi, fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

M.Z. Sharipov

Ilmiy kengash huzuridagi Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy seminar raisi, fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda elastik va qovushqoq toshli muhitlardan tashkil topgan to'liq o'tkazgichlarda to'liq tarqalishi muammosini o'rganish bo'yicha yuzdan ortiq ilmiy-tadqiqot muassasalarida ilmiy tadqiqotlar olib borishda gruntli muhit xossalari qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida yer usti va yer osti inshootlarining har xil kvazistatik va dinamik seysmik to'liqlar ostida bo'lganligi sababli, ularning mustahkamligini ta'minlash va inshoot konstruksiyalarining tarkibiy qismi bo'lgan elastik va qovushqoq – elastik elementlarda hosil bo'ladigan dinamik kuchlanishlar va deformatsiyalarni o'rganish maqsadida, ularda to'liq tarqalishining dinamikasini va usullarini amaliyotga joriy etishni taqazo etadi. Shu jihatdan globallashuv va axborot almashish jarayonining intensivlashuvi sharoitida yer usti va yer osti inshootlari konstruksiyalarida samarali vositalardan foydalanish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda yer usti va yer osti inshootlari zilzilabardoshligi sohasida qo'llaniladigan materiallarning, shu jumladan ko'p qatlamli murakkab tarkibga va fizik xossalarga ega bo'lgan muhitlarga va plastinkasimon konstruksiyalarning mustahkamligini oshirishga yo'naltirilgan ilmiy tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada materialning qovushqoq-elastiklik xususiyatini hisobga olib, dinamik masalalar yechish borasida sezilarli natijalarga erishildi, xususan, inshootlarni zilzila bardoshligini oshirishda gruntli muhitda seysmik to'liqlar tarqalishi natijasida hosil bo'ladigan kuchlanishlar va ularning momenlarini hisobga olib, inshootlarning dinamik kuchlanganlik-deformatsiya holatini baholashga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda to'liq tarqalish jarayonida hosil bo'ladigan mikrotebranishlarning salbiy ta'sirini kamaytirib detal va qurilmalarning mustahkamligini oshirish muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega bo'lib, noyob fizik va mexanik xususiyatli konstruksion materiallar uchun zamonaviy texnika va texnologiyalar keng qo'llanilayotgani sababli muhit bilan aloqada bo'lgan plastinkasimon va silindrik qovushqoq-elastik qobiqlarda to'liq tarqalishi xususiyatlarini o'rganish metodikasini yaratish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktyabrdagi "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi Farmonida, jumladan, "...ilmiy-innovatsion salohiyatdan keng foydalanish, istiqbolda ilm-fanni muntazam isloh qilib borishning ustuvor yo'nalishlarini belgilash, zamonaviy bilimga ega va mustaqil fikrlaydigan yuqori malakali kadrlar tayyorlash,..."¹ vazifalari belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, deformatsiyalanuvchi muhit bilan o'zaro ta'sirda bo'lgan uch qatlamli plastinkalarning tebranishlari masalalarida rezonans sohasidagi titrashlarni bartaraf etish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 30-iyuldagi PQ-4794-sonli "O'zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini tubdan takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida" Qarori, "Matematika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida" PQ-4708-sonli 2020-yil 7-maydagi Prezident Qarori hamda mazkur faoliyatlarga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktyabrdagi PF-6097-son "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi Farmoni

amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar rivojlanishining IV. «Matematika, mexanika, inshootlar seysmodinamikasi va informatika» hamda XIV. «Seysmologiya, binolar va inshootlar seysmik xavfsizligi va qurilish» ustuvor yo‘nalishlari doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Simmetrik bo‘lmagan elastiklik nazariyasining (Kossera muhiti) rivojlanishi o‘tgan asrning 50-yillaridan boshlangan. Simmetrik bo‘lmagan elastiklik nazariyasida to‘lqin elastik muhit bilan kontaktda bo‘lgan jismlarning dinamik kuchlanganlik-deformatsiyasi muammosini ilmiy nuqtai-nazardan quyidagi xorijiy davlat olimlari Novaskiy V., Koster V.T., Aero E.L., Kuvshinskiy YE.V., Mindlin R.D., Tirsten G.F., Tupin R.A., Kunin I.A., Palmov V.A., Lurye A.I., Pobedre B.YE., Matveyenko V.P., Kuleshu M.A., Brovko G.A., Rajneesh Kumar, Jun Liu, Nistor I., Suiker A.S. va boshqa olimlar tomonidan ilmiy tadqiqot ishlari olib borilgan.

Respublikamiz olimlari tomonidan gruntli muhitda to‘lqin tarqalishi va muhitni kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatlarini o‘rganish va baholash bo‘yicha Raxmatulin X.A., O‘rozboyev M.T., Kabulov V.K., Rashidov T.R., Muborakov Y.N., Mirsaidov M.M., Mardonov B.M., Sultonov K.S., Mirzayev I.K., Abdukadirov S., Xudoynazarov X., Yuldashov SH.S., Safarov I.I. va boshqa olimlar ish olib borishgan. Ular muhit bilan aloqada bo‘lgan plastinkasimon, silindrik yoki sferik ko‘rinishdagi jismlarda to‘lqin yuklanishi masalalarini hisoblash usullarini rivojlantirishga o‘zlarining salmoqli hissalarini qo‘shishgan. Hozirgi vaqtda muhitning qovushqoqlik xususiyatlarini hamda bir jinsli bo‘lmagan xususiyatlarini hisobga olgan holda xos to‘lqinni Kossera muhitida tarqalish xususiyatlarini va dinamik holatini baholash uslublari to‘la ishlab chiqilmagan.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasasining ilmiy-tadqiqot rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti Qarshi filiali ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq bajarilgan

Tadqiqotning maqsadi qovushqoq-elastik Kossera muhitidan iborat yarim tekislik, qatlam va ikki qatlamli to‘lqin o‘tkazgichlarda xos to‘lqin tarqalishi hamda so‘nishi, muhitning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holati va hosil bo‘ladigan rezonans holatini baholashga qaratilgan hisoblash metodikasi va dasturini ishlab chiqish, analitik va sonli hisoblash usullarini takomillashtirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

qovushqoq-elastik Kossera muhitidan iborat to‘lqin o‘tkazgichlarda to‘lqin tarqalishi va so‘nish xususiyatlarini o‘rganish masalalarini matematik qo‘yish, yechish metodikasi, algoritmini ishlab chiqish;

qovushqoq-elastik Kossera muhitidan iborat yarim tekislik sirtida Reley va ikki muhit kontaktda Stounli to‘lqinlar tarqalish tezligi hamda ularni so‘nishiga solishtirma baho berish;

dissipativ bir jinsli bo‘lmagan ikki qatlamli qovushqoq - elastik Kossera muhitidan iborat uzun to‘lqin o‘tkazgichlarda kompleks faza tezligining bir nechta modasini to‘lqin soniga nisbatan o‘zgarishiga solishtirma baho berish hamda olingan natijalar asosida to‘lqinning so‘nishiga parametrik baho berish;

ideal elastik muhitdan farqli qovushqoq-elastik Kossera muhitida paydo bo‘ladigan yangi to‘lqinning faza tezligi va so‘nishini tadqiq qilish.

Tadqiqotning obyekti sifatida qovushqoq-elastik yarim tekislik, qatlam va ikki qatlamli Kossera muhitidan iborat bo'lgan jism (yoki to'ldiruvchi o'tkazgich) olingan.

Tadqiqotning predmeti garmonik to'ldiruvchi ta'sirida deformatsiyalanuvchan ikki qatlamli qovushqoq-elastik to'ldiruvchi o'tkazgichning materiallarning reologik xossalarini e'tiborga olgan holda kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holati va dinamik xarakteristikalarini aniqlash jarayonlarini tashkil etadi.

Tadqiqot usullari. Tadqiqot jarayonida deformatsiyalanuvchan qattiq jismlar mexanikasi va qurilish mexanikasi usullaridan, hisoblash matematikasi, matematik modellashtirish, dasturlash usullari, xususiylas hosilali differensial tenglamalarni yechish uchun "muzlatish", o'zgaruvchilarni ajratish, Gauss, Laplas va chekli ayirmalar usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

birinchi marta qovushqoq-elastik Kossera muhitidan iborat ko'p qatlamli to'ldiruvchi o'tkazgichlarda to'ldiruvchi tarqalishining integro-differensial tenglamalari elastiklik nazariyasining Nav'e va Lamé tenglamalarini chiqarish usuliga asoslanib olindi to'ldiruvchi dinamikasi nazariyasining usullari yordamida yechish metodikasi va algoritmi ishlab chiqilgan;

qovushqoq-elastik Kossera muhitidan iborat yarim tekislik sirtida Reley va ikki muhit kontaktida Stouli to'ldiruvchilarining tarqalish tezliklari va so'nishini klassik muhitdan farqli chastotaga bog'liqligi, ya'ni, yuqori chastotalar uchun kuchayib borishi samarasi topilgan va solishtirma baho berilgan;

dissipativ bir jinsli bo'lmagan ikki qatlamli qovushqoq - elastik Kossera muhitidan iborat uzun to'ldiruvchi o'tkazgichlarda kompleks faza tezligi modalarini to'ldiruvchi soniga nisbatan o'zgarishi monoton bo'lmagan funksiyalar orqali ifodalaniishi sonli natijalarni tahlili asosida topilgan va shunga ko'ra to'ldiruvchining so'nishini ifodalovchi parametrga baho berilgan;

qovushqoq-elastik Kossera muhiti zaralarida ta'sir etadigan ichki kuchlanishlar va momentlarni hisobga olish, to'ldiruvchi tarqalishida klassik elastik muhitdan farqli ikkita dispersion munosabat mavjud bo'lishi to'ldiruvchi nazariyasining usullari asosida topilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

garmonik to'ldiruvchi ta'siridagi deformatsiyalanuvchan yarim tekislik bilan kontaktda bo'lgan qatlamda hosil bo'ladigan to'ldiruvchi tarqalish chastotasi va so'nish koeffitsiyentlariga solishtirma baho berilgan;

garmonik to'ldiruvchi ta'sirida bo'lgan ikki qatlamli to'ldiruvchi o'tkazgichda to'ldiruvchi tarqalish chastotasi va so'nish koeffitsiyentlariga solishtirma baho berilgan;

bo'ylama va ko'ndalang to'ldiruvchi ta'siri ostida bo'lgan toshli muhitda klassik elastik muhitdan farqli yangi to'ldiruvchining tarqalish tezligi va rezonans hosil qilish xususiyatlariga baho berildi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi chegaraviy shartlarning korrekt qo'yilishi, keltirib chiqarilgan matematik ifodalarning qat'iyligi, asoslangan yechish usullaridan tizimli foydalanilganligi, yechimlarning aniqliligini baholashda boshqa tadqiqotchilar yechimlari bilan taqqoslanganligi va ularning natijalariga mos tushganligi hamda amaliyotga joriy qilinganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati sifatida deformatsiyalanuvchan muhit bilan kontaktda bo'lgan qatlamli muhitda hosil bo'ladigan to'ldiruvchi dinamikasi va difraksiyasi nazariyasining rivojlanishiga hissa qo'shish hamda takomillashtirish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati. Ikki katlamli qovushqoq elastik Kossera muhitidan iborat bo‘lgan to‘lqin o‘tkazgichlarda to‘lqin tarqalishi va tebranishlar formasini qurishga mo‘ljallangan amaliy dasturlar kompleksini ishlab chiqishga xizmat qiladi. Sirt to‘lqinlarini qovushqoq-elastik Kossera yarim tekislikda tarqalishini kompleks chastotaga bog‘liq tadqiq qilish, seysmik to‘lqinlarni tarqalishi va inshootlarga ta‘sir qilishini, hamda hosil bo‘ladigan kuchlanishlar va deformatsiyalarni optimallashtirishga imkon yaratadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Kossera muhitidan iborat to‘lqin o‘tkazgichlarda garmonik to‘lqinlarni tarqalish xususiyatlari tadqiqot ishi bo‘yicha olingan ilmiy natijalari asosida:

qobiqdagi zo‘riqish momentlarini hisoblash metodikasi va algoritmidan Urganch davlat universitetida 2017-2020 yillarda bajarilgan OT-F4-04(05) “Material nochizikli evolyutsion tenglamalarni yechishni spektral usulini qo‘llash. Yurak tomir sistemasi biomexanikasi” mavzusidagi fundamental loyihasi (Urganch davlat universitetining 2024 yil 26 sentabrdagi 04-04/01-11/4072-sonli ma‘lumotnomasi) foydalanilgan. Natijada, yuqori qovushqoq elastik qon tomirlardan suyuqlik oqishi tufayli devorlarda hosil bo‘ladigan moment kuchlanishlarini hisoblash imkoni yaratilgan;

quvur sirtida va muhitda hosil bo‘ladigan xos (erkin) to‘lqinning tarqalishida hosil bo‘ladigan rezonans sohalarini aniqlash usullaridan Toshkent kimyo-texnologiya institutida 2016-2020 yillarda bajarilgan OT-F4-01 raqamli “Qovushqoq suyuqlik oquvchi ko‘p qatlamli kompozit quvurlar egri chiziqli bo‘laklarining harorat va dinamik yuklanishlar ta‘sirida chiziqli bo‘lmagan dinamik kuchlanish-deformatsiya holatini o‘rganish usullarini ishlab chiqish va nazariyasini rivojlantirish” mavzusidagi fundamental ilmiy-texnikaviy loyihada (Toshkent kimyo-texnologiya institutining 2024 yil 14 sentabrdagi № 1/04-2380-sonli ma‘lumotnomasi) foydalanilgan. Natijada, ko‘p qatlamli kompozit muhitda to‘lqin tarqalishida rezonans sohalarini oldindan aniqlash va baholash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 6 ta xalqaro, 2 ta respublika ilmiy - amaliy anjumanlarida ma‘ruza qilingan va muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 15 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta maqola, jumladan, 4 tasi respublika va 3 tasi xorijiy jurnallarda nashr qilingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 120 betni tashkil qiladi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya tadqiqotining dolzarbligi va zaruriyati asoslab berilgan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obyekt va predmetlari shakllantirilgan. Tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga muvofiqligi ko‘rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon etilgan. Olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning ilmiy va amaliy ahamiyatlari yoritilgan. Tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etilishi, ishning aprobatyasi, chop etilgan ishlar, dissertatsiya tuzilishi va hajmi bo‘yicha ma‘lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning “**Qovushqoq-elastik Kossera muhitida garmonik to‘lqinlarni tarqalishiga bag‘ishlangan adabiyotlar tahlili**” deb nomlangan birinchi bobi uchta paragrafdan iborat bo‘lib, birinchi paragrafda momentsiz elastik muhit va jismlarga to‘lqin tarqalish masalasiga bag‘ishlangan ishlarning qisqacha tahlili keltirilgan. Simmetrik bo‘lmagan elastiklik nazariyasining umumlashgan nazariyasi 1910-yil aka-uka Kossalar tomonidan ishlab chiqilgan. Klassik elastiklik nazariyasida muhitning deformatsiya holati nuqtaning deformatsiyasi yoki ko‘chishi bilan baholanadi. Kossalar tomonidan tavsiya etilgan modelga ko‘ra, har bir nuqtani ko‘chishi ortogonal uchburchak bilan ifodalanadi, hamda muhitning har bir nuqtasi absolyut qattiq jismdan iborat deb qaraladi. Bu model olinganda muhitda kuchlanish tenzoridan tashqari, moment kuchlanishlar tenzori paydo bo‘lib, tenzorlar osesimmetrik bo‘lmaydi. Bu nazariyani rivojlanishida Kossalardan keyin Trusdel, Kuvshinskiy, Aero, Palmov, Novaskiy, Tupin va boshqalar katta hissa qo‘shgan. Olimlar tomonidan bu modelni soddalashtirilgan hollari tavsiya etilgan, ulardan biri psevdokontinuum Kossara deb atalgan. Ular bu holda buralish vektorini $\vec{\theta} = \frac{1}{2} \text{rot} \vec{u}$ deb olgan. Bu holatda ham

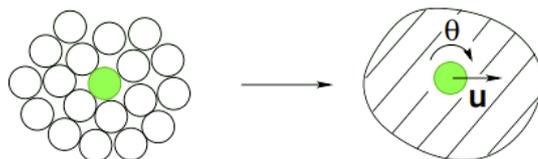
qo‘yilgan masala klassik elastiklik nazariyaga olib kelingan. Ikkinchi paragrafda Kossara muhitidan iborat bo‘lgan yarim tekislikda erkin (yoki xos) to‘lqin tarqalishi masalasini o‘rganishga bag‘ishlangan adabiyotlarning qisqacha tahlili keltirilgan. Uchinchi paragrafda gruntlar yoki quduqni o‘rab turuvchi muhitda to‘lqin tarqalishi masalasini o‘rganishga bag‘ishlangan adabiyotlar tahlili keltirilgan. Tahlillar umumlashtirilib xulosa keltirilgan. Bu xulosalar bo‘yicha qovushqoq-elastik Kossara muhitida to‘lqin tarqalishini ifodalovchi dispersion tenglama topilmagan, hamda yechish uslubiyoti va algoritmi ishlab chiqilmagan; qovushqoq-elastik momentli muhitdagi silindrik qobiqda to‘lqin tarqalish tenglamasi umumiy holda topilmagan, yechish uslubiyoti va algoritmi ishlab chiqilmagan; To‘lqin tarqalishini ifodalovchi chegaraviy masala va undan kelib chiquvchi spektral masala qo‘yilmagan, yechish metodikasi va algoritmi ishlab chiqilmagan; adabiyotlar tahlili natijalaridan kelib chiqadiki momentli nazariya (yoki Kossara) muhitida zarralarni tebranishlarini o‘rganishga chuqur ahamiyat berilmagan. Bu xulosalar asosida dissertatsiya ishining maqsadi belgilangan va shu maqsadga muvofiq vazifalar qo‘yilgan.

Dissertatsiyaning “**Kossara muhitidan iborat to‘lqin o‘tkazgichlarda garmonik to‘lqinlar tarqalish masalalarini qo‘yilishi, yechish metodikasi va algoritmi**” deb nomlangan ikkinchi bobi to‘rtta paragrafdan iborat bo‘lib, bu bobda qovushqoq elastik qatlamli tekis muhitda erkin to‘lqinlarining tarqalishi masalasining qo‘yilishi, yechish metodikasi va algoritmi keltirilgan. Ixtiyoriy A silliq sirt bilan chegaralangan soha berilgan bo‘lsin. dA - kichik element, $\vec{p}dA$ - orqali kuch vektorini va $\vec{m}dA$ - moment vektori bilan belgilaymiz. X - hajmiy kuch va Y - hajmiy moment vektorlarini belgilaymiz. Muhitdan ajratib olingan V hajmiy elementni harakat differensial tenglamasi variatsion prinsip asosida quyidagicha olingan:

$$\int_A p_i dA + \int_V X_i dV = 0, \quad (1)$$

$$\int_A (\epsilon_{ijk} x_i p_k + m_i) dA + \int_V (\epsilon_{ijk} x_i X_k + Y_i) dV = 0; i, j, k = 1, 2, 3.$$

Bu (1) tenglamalar uchun muhit modeli 1- rasmda keltirilgan.



1-rasm. Kossera muhiti modeli

$$p_i(n) = \sigma_{ji}n_j, m_i(n) = \mu_{ji}n_j. \quad (2)$$

Yuqorida keltirilgan (1) tenglamani birinchisidan quyidagi tenglamani olamiz

$$\int_V (\sigma_{ji,j} + X_i) dV = 0. \quad (3)$$

(1) tenglamani ikkinchisidan quyidagi tenglamalar sistemasini olamiz

$$\int_V [\epsilon_{ijk} x_j (\sigma_{ik,i} + X_k) + \epsilon_{ijk} \sigma_{ik} + \mu_{ij,j} + Y_i] dV = 0. \quad (4)$$

Oxirgi olingan (3) va (4) tenglamalardan quyidagi differensial tenglamalar sistemasiga olib kelinadi

$$\begin{aligned} \sigma_{ji,j} + X_i &= \rho \ddot{u}_i, \\ \epsilon_{ijk} \sigma_{jk} + \mu_{ij,j} + Y_i &= j \ddot{\theta}_i. \end{aligned} \quad (5)$$

Bu yerda ρ - materialning zichligi. Ixtiyoriy A silliq sirt bilan chegaralangan soha berilgan bo'lsin (1-rasm). Kuchlanishlar va deformatsiyalar orasidagi bog'lanish yoki asosiy fizik munosabat quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= 2\tilde{\mu}\gamma_{(ij)} + 2\tilde{\alpha}\gamma_{(ij)} + \tilde{\lambda}\gamma_{kk}\delta_{ij}, \\ \mu_{ij} &= 2\tilde{\gamma}\chi_{(ij)} + 2\tilde{\epsilon}\chi_{(ij)} + \beta\chi_{kk}\delta_{ij}, \end{aligned}$$

bunda $\tilde{\mu}_k, \tilde{\lambda}_k, \tilde{\alpha}_k, \tilde{\beta}_k, \tilde{\gamma}_k, \tilde{\epsilon}_k$ - mos ravishda Lamening operator koefitsiyentlari va Kossera muhiti doirasidagi elastik operator parametrlari bo'lib quyidagicha ko'rinishga ega:

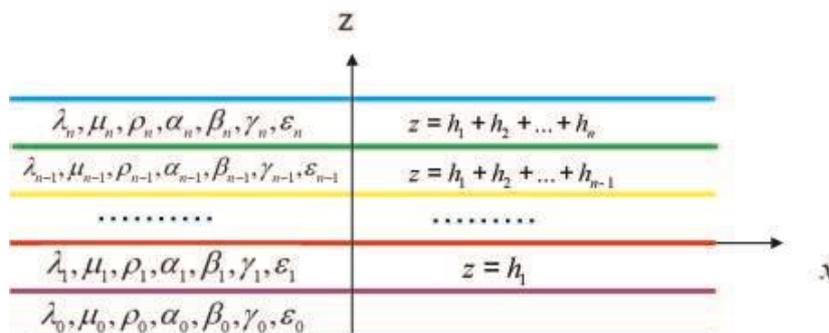
$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_k f(t) &= \gamma_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\gamma}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \tilde{\epsilon}_k f(t) = \epsilon_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\epsilon}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \\ \tilde{\lambda}_k f(t) &= \lambda_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\lambda}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \tilde{\mu}_k f(t) = \mu_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\mu}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \\ \tilde{\alpha}_k f(t) &= \alpha_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\alpha}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \tilde{\beta}_k f(t) = \beta_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\beta}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

u yerda $\mu_{k0}, \lambda_{k0}, \alpha_{k0}, \beta_{k0}, \gamma_{k0}, \epsilon_{k0}$ - qovushqoq elastik Kossera muhiti uchun oniy elastik parametrlar, $R_{k\gamma}(t-\tau), R_{k\epsilon}(t-\tau), R_{k\lambda}(t-\tau), R_{k\mu}(t-\tau), R_{k\alpha}(t-\tau), R_{k\beta}(t-\tau)$ - relaksatsiya yadrolari. Birinchi paragrafida dinamik masalalarni qo'yilishi va umumiy munosabatlar keltirilgan. Ko'pincha statsionar masalalar uchun yuqorida (6) munosabat ham qovushqoqlikni kompleks elastiklik modeliga olib kelinadi. Bu modellar statsionar jarayonlar uchun ekvivalent bo'ladi. Bu paragrafda Kossera muhitidan iborat qovushqoq-elastik chekli qatlamli muhit (yoki konstruksiya)dagi dinamik jarayonlarni o'rganishdagi umumiy munosabatlarni keltirib o'tamiz.

Faraz qilaylik qatlamli muhit dekart koordinatalar sistemasida berilgan bo'lsin. Shu muhitga to'lqin tarqalish masalalarini ko'ramiz. Hisob sxemalari 2 -rasmga

keltirilgan. Asosiy maqsad qatlamli qovushqoq - elastik Kossera muhitda erkin to'liqlarni tarqalishini o'rganishdan iborat. Kossera muhiti harakat differensial tenglamasi quyidagicha olingan :

$$\begin{aligned} (2\tilde{\mu}_k + \tilde{\lambda}_k) \text{grad div } \vec{u} - (\tilde{\mu}_k + \tilde{\alpha}_k) \text{rot rot } \vec{u} + 2\tilde{\alpha}_k \text{rot } \vec{\theta} + \vec{X}_k &= \rho_k \ddot{\vec{u}}, \\ (\tilde{\beta}_k + 2\tilde{\gamma}_k) \text{grad div } \vec{\theta} - (\tilde{\gamma}_k + \tilde{\varepsilon}_k) \text{rot rot } \vec{\theta} + 2\tilde{\alpha}_k \text{rot } \vec{u} - 4\tilde{\alpha}_k \vec{\theta} + \vec{Y}_k &= j_k \ddot{\vec{\theta}}, \end{aligned} \quad (7)$$



2-rasm. Yarim tekislikda o'rnatilgan ko'p qatlamli muhit

ρ_k - materialning zichligi, j_k - inersiya momenti zichligi, \vec{X}_k - hajmiy kuch zichlik vektori, \vec{Y}_k - hajmiy moment zichlik vektori. Agar Kossera muhitidan tashkil topgan yarim tekislikda erkin to'liqin yoki Reley to'liqinini tarqalishi ko'rilsa, u holda chegaraviy shartlar (kuchlanishlar va moment kuchlanishlari) quyidagicha topiladi, ya'ni kuchlanishlar va moment kuchlanishlari nol bo'ladi

$$\begin{aligned} \sigma_{zx} = 0, \sigma_{zy} = 0, \sigma_{zz} = 0, \\ \mu_{zx} = 0, \mu_{zy} = 0, \mu_{zz} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Bu yerda z o'qi tekislikka tik yo'nalgan, x va y o'qlari gorizontall tekislik bo'ylab yo'nalgan. Agar ikkita yarim tekislik qattiq mahkamlangan bo'lsa yoki birlashgan bo'lsa, u holda kontaktda qattiq mahkamlanganlik sharti qo'yiladi (2 -rasm)

$$\begin{aligned} \sigma_{zx1} = \sigma_{zx2}, \sigma_{zy1} = \sigma_{zy2}, \sigma_{zz1} = \sigma_{zz2}, \\ \mu_{zx1} = \mu_{zx2}, \mu_{zy1} = \mu_{zy2}, \mu_{zz1} = \mu_{zz2}, \\ u_{x1} = u_{x2}, u_{y1} = u_{y2}, u_{z1} = u_{z2}, \\ W_{x1} = W_{x2}, W_{y1} = W_{y2}, W_{z1} = W_{z2}. \\ \sigma_{zx1} = \sigma_{zx2}, \sigma_{zy1} = \sigma_{zy2}, \sigma_{zz1} = \sigma_{zz2}, \\ u_{x1} = u_{x2}, u_{y1} = u_{y2}, u_{z1} = u_{z2}, \\ \mu_{zx2} = 0, \mu_{zy2} = 0, \mu_{zz2} = 0, \\ W_{x2} = 0, W_{y2} = 0, W_{z2} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Bunday ko'p qatlamli muhit qovushqoq-elastik Kossera muhiti modelini tavsiya qilinishi yangi modelni, ya'ni qovushqoq-elastik Kossera muhitini tavsiyasi bo'ladi. Asosiy maqsad tavsiya etilgan model asosida yangi masalalar yechish, olingan sonli natijalarni klassik elastiklik nazariyasi masalalari bilan solishtirishdan iborat. Ikkinchi paragrafda tekis masalaga keladigan jismlarda to'liqin tarqalish masalasini yechish metodikasi va algoritmi keltirilgan. Qatlamli uzun plastinkasimon qovushqoq-elastik (dissipativ bir jinsli va bir jinsli bo'lmagan) Kossera muhitidan iborat to'liqin o'tkazgichlarda garmonik xos to'liqlarni tarqalishi o'rganiladi. Muzlatish usulini

qo'llash natijasida yuqorida olingan (7) integro-differensial tenglama kompleks koeffitsiyentli xususiy hosilali tenglamaga keladi.

$$\begin{cases} (2\bar{\mu}_n + \bar{\lambda}_n) \text{grad div} \bar{u}_n - (\bar{\mu}_n + \bar{\lambda}_n) \text{rot rot} \bar{u}_n + 2\bar{\alpha}_n \text{rot} \bar{\theta}_n + \bar{X}_n = \rho_n \frac{\partial^2 \bar{u}_n}{\partial t^2}, \\ (\bar{\beta}_n + 2\bar{\gamma}_n) \text{grad div} \bar{\theta}_n - (\bar{\gamma}_n + \bar{\varepsilon}_n) \text{rot rot} \bar{\theta}_n + 2\bar{\alpha}_n \text{rot} \bar{u}_n - 4\bar{\alpha}_n \bar{\theta}_n + \bar{Y}_n = j_n \frac{\partial^2 \bar{\theta}_n}{\partial t^2}. \end{cases} \quad (10)$$

bunda

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_n f(t) &= \lambda_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\lambda}^{(c)} - i\Gamma_{n\lambda}^{(s)} \right] f(t), \quad \bar{\mu}_n f(t) = \mu_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\mu}^{(c)} - i\Gamma_{n\mu}^{(s)} \right] f(t), \\ \bar{\alpha}_n f(t) &= \alpha_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\alpha}^{(c)} - i\Gamma_{n\alpha}^{(s)} \right] f(t), \quad \bar{\beta}_n f(t) = \beta_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\beta}^{(c)} - i\Gamma_{n\beta}^{(s)} \right] f(t), \\ \bar{\gamma}_n f(t) &= \gamma_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\gamma}^{(c)} - i\Gamma_{n\gamma}^{(s)} \right] f(t), \quad \bar{\varepsilon}_n f(t) = \varepsilon_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\varepsilon}^{(c)} - i\Gamma_{n\varepsilon}^{(s)} \right] f(t). \end{aligned}$$

Yuqorida olingan kompleks koeffitsiyentli differensial tenglama xususiy hosilali kompleks koeffitsiyentli differensial tenglamalar sistemasiga olib kelib, analitik yechiladi. Bu dissertatsiyada analitik yechish usuli ishlab chiqarilgan. (10) tenglamani umumiy yechimini quyidagi ko'rinishida izlaymiz

$$\bar{u}_n(x, z, t) = \bar{U}_n(z) e^{i(kx - \omega t)}, \quad \bar{\theta}_n(x, z, t) = \bar{\Omega}_n(z) e^{i(kx - \omega t)} \quad (11)$$

bunda $\bar{U}_n(z), \bar{\Omega}_n(z)$ - ko'chish va moment amplitudasi, vektor kattalik hisoblanadi. Agar (11) ni (10) tenglamaga qo'ysak va hajmiy kuchlarni hisobga olmasak, u holda kompleks koeffitsiyentli oddiy differensial tenglamalar sistemasini olamiz

$$\begin{cases} (2\bar{\mu}_n + \bar{\lambda}_n) \text{grad div} \bar{U}_n - (\bar{\mu}_n + \bar{\lambda}_n) \text{rot rot} \bar{U}_n + 2\bar{\alpha}_n \text{rot} \bar{\Omega}_n + \rho_n \omega^2 \bar{U}_n(z) = 0, \\ (\bar{\beta}_n + 2\bar{\gamma}_n) \text{grad div} \bar{\Omega}_n - (\bar{\gamma}_n + \bar{\varepsilon}_n) \text{rot rot} \bar{\Omega}_n + 2\bar{\alpha}_n \text{rot} \bar{U}_n - 4\bar{\alpha}_n \bar{\Omega}_n + j_n \omega^2 \bar{\Omega}_n = 0. \end{cases} \quad (12)$$

bu yerda

$$\begin{aligned} \bar{u}_n(x, z, t) &= \bar{U}_n \{ U_x(z), U_y(z), U_z(z) \} e^{i(kx - \omega t)}, \\ \bar{\theta}_n(x, z, t) &= \bar{\Omega}_n \{ W_x(z), W_y(z), W_z(z) \} e^{i(kx - \omega t)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Agar (13) ni (12) ga qo'ysak quyidagicha oddiy differensial tenglamalar sistemasini olamiz. Yuqorida keltirilganlardan foydalanib $U_n(z), W_n(z)$ - yechimlarni ham yozishimiz mumkin bo'ladi

$$\begin{aligned} U_x(z) &= ikE_0 e^{-\eta_0 z} + E_1 \eta_1 e^{-\eta_1 z} + E_2 \eta_2 e^{-\eta_2 z}, \\ U_y(z) &= \frac{B-1}{2A^2 B} \left\{ D_1 \left(x_1 - \frac{\omega^2}{C_4^2} + \frac{4A^2 B}{B-1} \right) e^{-\xi_1 z} + D_2 \left(x_2 - \frac{\omega^2}{C_4^2} + \frac{4A^2 B}{B-1} \right) e^{-\xi_2 z} \right\}, \\ U_z(z) &= \eta_0 E_0 e^{-\eta_0 z} + irE_1 e^{-\eta_1 z} + ikE_2 e^{-\eta_2 z}, \\ W_x(z) &= ikD_0 e^{-\xi_0 z} + D_1 \xi_1 e^{-\xi_1 z} + D_2 \xi_2 e^{-\xi_2 z}, \\ W_y(z) &= \frac{B}{2} \left\{ E_1 \left(x_1 - \frac{\omega^2}{C_3^2} \right) e^{-\eta_1 z} + E_2 \left(x_2 - \frac{\omega^2}{C_3^2} \right) e^{-\eta_2 z} \right\}, \\ W_z(z) &= ikD_0 e^{-\xi_0 z} + ikD_1 e^{-\xi_1 z} + ikD_2 e^{-\xi_2 z}, \end{aligned} \quad (14)$$

bunda

$$\eta_0 = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{C_1^2}}, \quad \xi_0 = \sqrt{k^2 + \frac{4A^2 B C_4^2}{(B-1)C_5^2} - \frac{\omega^2}{C_5^2}},$$

$$\eta_1 = \xi_1 = \sqrt{k^2 - x_1}, \eta_2 = \xi_2 = \sqrt{k^2 - x_2},$$

$$x_{1,2} = \frac{C_3^2 + C_4^2}{2C_3^2 C_4^2} \omega^2 - 2A^2 \pm \sqrt{\frac{(C_3^2 - C_4^2)^2}{4C_3^4 C_4^4} \omega^4 - \frac{2A^2(C_2^2 C_3^2 - 2C_3^2 C_4^2 + C_2^2 C_4^2)}{C_2^2 C_3^2 C_4^2} \omega^2 + 4A^4}.$$

Olingan yechim asosida Kossera muhitida erkin to‘lqin tarqalishi yoki majburiy (statsionar yoki garmonik, noturg‘un) to‘lqin tarqalishi masalalari yechiladi. Uchinchi paragrafda tekis qatlamlardan tashkil topgan qovushqoq elastik dissipativ to‘lqin o‘tkazgichlarda to‘lqin tarqalishi masalasini qo‘yilishi va yechilish metodikasi keltirilgan. To‘rtinchi paragrafda ko‘p qatlamli Kossera muhitidan iborat konstruksiyalarda Dispersion munosabatni topish va sonli natijalar olishning umumiy algoritmi keltirilgan. Masalalarni qo‘yilishi, yechish metodikasi va algoritmi bo‘yicha xulosalar qilingan.

Dissertatsiyaning **“Qovushqoq-elastik Kossera muhitidan iborat yarim tekisligida sirt to‘lqinlarini tarqalishi”** deb nomlangan uchinchi bobda qovushqoq-elastik Kossera muhitida sirt to‘lqinlarini tarqalishi masalalari yechiladi, sonli natijalar olinib tahlil qilinadi. Asosan Reley, Stounli va Lemb to‘lqinlarini tarqalishini ko‘rib chiqamiz. Dispersion tenglama analitik ko‘rinishda olinadi. Muhit qovushqoq-elastik bo‘lganligi uchun dispersion tenglamadagi noma’lumlar kompleks kattalik bo‘ladi. Kompleks parametrli transendent tenglama Myuller va Laplas usullari asosida sonli yechiladi. Kossera muhitida to‘lqin tarqalishi uchun olingan natijalar klassik elastiklik nazariyasida olingan yechimlar bilan solishtirilgan. Bu bobning birinchi paragrafida qovushqoq-elastik Kossera muhitida sirt Reley to‘lqinlarini tarqalishi xususiyatlari o‘rganilgan. Yarim tekislik chegarasi kuchlanishlardan ozod qilingan bo‘lsin, u holda

$$\sigma_{zx}|_{z=0} = 0, \sigma_{zy}|_{z=0} = 0, \sigma_{zz}|_{z=0} = 0, \mu_{zx}|_{z=0} = 0, \mu_{zy}|_{z=0} = 0, \mu_{zz}|_{z=0} = 0, \quad (15)$$

Agar yuqorida olingan (14) umumiy yechimdan va (15) chegaraviy shartlardan foydalansak quyidagi ko‘rinishdagi bir jinsli kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalalar sistemasini olamiz. U yechimga ega bo‘lishi uchun uni asosiy aniqlovchisi nolga teng bo‘ladi.

$$\det \left[M_p(p_1, p_2, p_3) \right] = \begin{vmatrix} 2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2} & -2ikp_2 & -2ikp_3 \\ 2ikp_1 & 2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2} & 2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2} \\ 0 & p_2(A_m - \frac{\omega^2}{C_3^2}) & p_3(A_p - \frac{\omega^2}{C_3^2}) \end{vmatrix} = 0,$$

$$\det \left[M_t(p_1, p_2, p_3) \right] = \begin{vmatrix} \frac{2ik}{1-B} & p_2(2 + \frac{A_m C_4^2 - \omega^2}{2A^2 C_4^2}) & p_3(2 + \frac{A_p C_4^2 - \omega^2}{2A^2 C_4^2}) \\ ikp_1(1+C) & p_2^2 + k^2 C & p_3^2 + k^2 C \\ (\frac{C_5^2}{C_4^2} - C - 1)k^2 - p_1^2 \frac{C_5^2}{C_4^2} & ikp_2(1+C) & ikp_3(1+C) \end{vmatrix} = 0$$

Bu yerda C - o‘lchamsiz parametr, $C = \frac{\gamma - \varepsilon}{\gamma + \varepsilon}$. Birinchi tenglamadan to‘lqin soni va

chastota orasidagi munosabatni olamiz $k(\omega)$. Agar Dispersion tenglama ochib yozilsa, u holda quyidagi tenglamani olamiz.

$$\sqrt{k^2 - x_1} \left(x_1 - \frac{\omega^2}{C_3^2} \right) \left((2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2})^2 - 4k^2 \sqrt{k^2 - x_2} \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{C_1^2}} \right) - \sqrt{k^2 - x_2} \cdot \left(x_2 - \frac{\omega^2}{C_3^2} \right) \left\{ (2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2})^2 - 4k^2 \sqrt{k^2 - x_1} \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{C_1^2}} \right\} = 0. \quad (16)$$

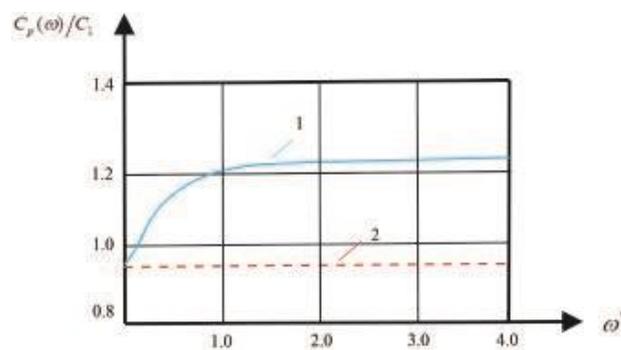
Bu tenglama Reley tenglamasi hisoblanadi. Dispersion tenglamani ikkinchisi soddalashtirilsa (u_y, θ_x, θ_z ko'chish komponentalari uchun) olingan tenglama ko'chish va buralish koeffitsiyentlari orasidagi munosabat beradi

$$E_1 = \frac{i(\omega^2 - 2k^2 C_2^2)(\omega^2 - x_2 C_3^2)}{2k C_2^2 C_3^2 (x_1 - x_2) \eta_1} E_0, E_2 = \frac{i(\omega^2 - 2k^2 C_2^2)(\omega^2 - x_1 C_3^2)}{2k C_2^2 C_3^2 (x_1 - x_2) \eta_2} E_0.$$

Bulardan foydalanib yarim tekislik nuqtalarini ko'chishi va buralishini topish mumkin bo'ladi. Hisoblashlarda yadro relaksatsiyasi uchun uch parametrlilik kuchsiz singulyar xossaga ega bo'lgan Rjanitsin-Koltunov yadrosi $R(t) = A e^{-\beta t} / t^{1-\alpha}$ dan foydalanilgan, bunda A, α, β - materiallarni reologik xossalarini ifodalovchi parametrlardir. Hisoblashlar uchun quyidagi parametrlar qabul qilingan:

$$A = 0.048, \beta = 0.05, \alpha = 0.1, \gamma = 1.936 \times 10^8 N, \\ \varepsilon = 3.046 \times 10^9 N, j = 10^3 kg / m^3, \lambda_0 = 2.8 \times 10^8 N / m^2, \\ \mu_0 = 4 \times 10^9 N / m^2, \rho = 10^5 kg / m^3, \alpha = 4 \times 10^9 N / m^2$$

Dispersion tenglamani ildizini topish uchun argumentga qiymat berib funksiyani absissa o'qi bilan kesishish nuqtasini topamiz. Faza tezligini mavhum qismi uchun zaperaniya (yutilish) ro'y bermasligi topildi. Yarim Kossera qovushqoq-elastik muhitda Reley to'liqini tarqalishida faza tezligini haqiqiy qismini (C_{ReR}^*) chastotaga bog'liq o'zgarishi 3-rasmda keltirilgan.

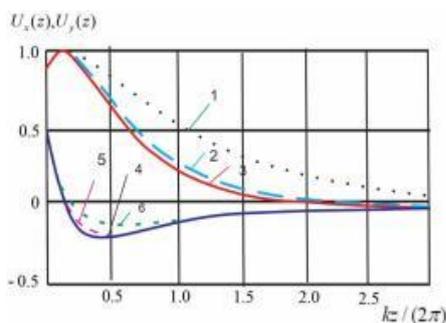


3-rasm. Kossera qovushqoq - elastik muhitda Reley to'liqini tarqalishida faza tezligini chastotaga bog'liq o'zgarishi

Agar muhit Kossera muhiti bo'lsa, u holda faza tezligi to'liq soni yoki chastotaga bog'liq bo'lar ekan. Bu faqat kichik chastotalar uchun o'rinli bo'lar ekan. Chastotani oshib borishi dispersiyani kuchsizlantirib nolga ham intilar ekan. Olingan Dispersion munosabatlar asosida tebranishlar formasi qurilgan. Ular 4-rasmlarda keltirilgan.

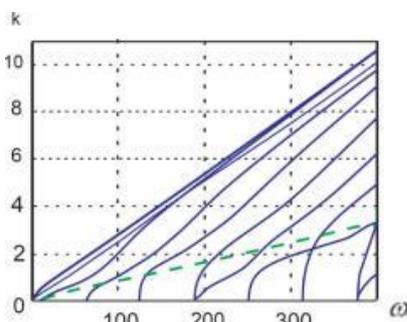
Shunday qilib bu paragrafda sirt to'liqlarini faza tezligi va chastotasi orasidagi munosabat qurildi. Reley to'liqini dispersiyaga uchrash sohasi topildi. Olingan natijalarni klassik elastiklik yoki qovushqoqlik nazariyasi masalalari bilan solishtirildi.

Bu bobning ikkinchi paragrafida Kossera muhitidan tashkil topgan qovushqoq-elastik plastinkaga Lemb va ikki muhit kontaktida Stounli to‘lqinlarini tarqalishi masalalari yechilgan, hamda sonli natijalar olinib tahlil qilingan. Lemb to‘lqini qovushqoq-elastiklik nazariyasi tenglamalariga asosan o‘rganiladi.



4-rasm. Tebranishlar formasini to‘lqin soniga bog‘liq o‘zgarishi

Bu plastinkani qalinligi, yuzalari va ulardan tashqari plastinka fiziko-mexanik xususiyatlariga bog‘liq bo‘lgan to‘lqin hisoblanadi. Lekin materiallarni qovushqoqligini hisobga olib o‘rganishga e‘tibor kam berilgan. Bunday to‘lqinlar signallarni qayta ishlash, materiallarni buzilmasligini o‘rganishga keng qo‘llaniladi



5-rasm. 17 -tenglikning 1 -shartidan kelib chiqadigan dispersion tenglamaning grafigi

Kossera muhiti uchun olingan Lemb to‘lqinini ifodalovchi yechim umumiy yechim hisoblanib, undan boshqa muhitlarda to‘lqin tarqalishini baholashda foydalanish mumkin. Lemb to‘lqinini o‘rganish uchun quyidagicha chegaraviy shartlar olingan:

$$\begin{aligned} \sigma_{zx}|_{z=\pm H} = 0, \sigma_{zy}|_{z=\pm H} = 0, \sigma_{zz}|_{z=\pm H} = 0, \\ \mu_{zx}|_{z=\pm H} = 0, \mu_{zy}|_{z=\pm H} = 0, \mu_{zz}|_{z=\pm H} = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

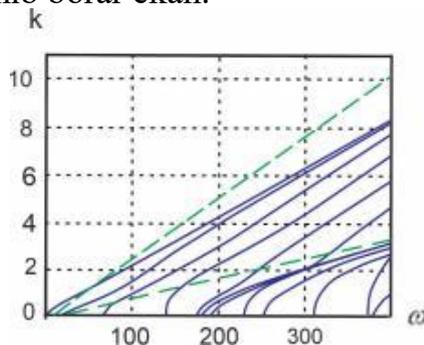
Oxirgi (17) dan ikkita dispersion tenglama olamiz. Ulardan birinchisi u_x, u_z, θ_y ko‘chish komponentalari bo‘yicha Lemb to‘lqinini tarqalishini ifodalaydi. Ikkinchi tenglama xuddi shunday u_y, θ_x, θ_z ko‘chish komponentlari uchun dispersion munosabatni ifodalaydi va ko‘ndalang to‘lqin dispersion munosabatini ifodalaydi. Sonli natijalar 6 va 7-rasmlarda keltirilgan

$$A = 0.048, \beta = 0.05, \alpha = 0.1, \beta = 10^8 N, \gamma = 1.936 \times 10^8 N, \varepsilon = 3.046 \times 10^9 N,$$

$$j = 10^3 kg / m^3, \lambda_0 = 2.8 \times 10^8 N / m^2, \mu_0 = 4 \times 10^9 N / m^2, \rho = 10^5 kg / m^3, \alpha = 4 \times 10^9 N / m^2$$

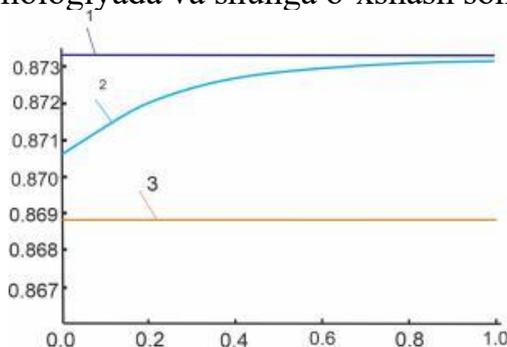
Dinamik harakati Kossera modeli bilan tavsiflangan qatlamda, Lemb to‘lqinidan tashqari, bitta ko‘ndalang siljish komponenti-amplitudaga ega bo‘lgan tubdan yangi to‘lqin mavjud bo‘lishi ko‘rinib turibdi. Bu to‘lqin ham chuqurlikka bog‘liq o‘zgarishi ko‘rinib turibdi. Bunday to‘lqin tarqalishi klassik elastiklik nazariyasida mavjud emas

(5 va 6 rasmlar). Rasmlarda keltirilgan punktir chiziqlar mos ravishda bo‘ylama va ko‘ndalang tezligini ifodalaydi. Shunday qilib simmetrik bo‘lmagan nazariya qo‘llanilganda yangi to‘lqin paydo bo‘lganligi bilan farqlanadi. Qovushqoqlik xossasini hisobga olish faza tezligini haqiqiy qismini 5% gacha kamaytirar ekan. Mavhum qismi esa to‘lqin soniga bog‘liq oshib borar ekan.



6-rasm. 17 -tenglikning 2 -shartidan kelib chiqadigan dispersion tenglamaning grafigi

Stounli to‘lqini ikkita yarim tekislikni birlashishidan hosil bo‘ladi. Har qaysi yarim tekislik alohida olinganda (1) differensial tenglamani qanoatlantiradi. Stounli to‘lqini klassik elastiklik nazariyasida dispersiyaga uchramaydigan normal to‘lqin deb qaraladi. Stounli to‘lqini yer osti inshootlarini mustahkamligini o‘rganishda, quduqlarni holatini o‘rganishda, seysmologiyada va shunga o‘xshash sohalarda keng qo‘laniladi.



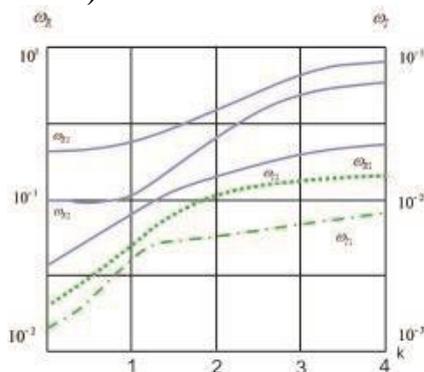
7-rasm. Faza tezlikni to‘lqin soniga bog‘liq o‘zgarishi

Yuqorida Kossera muhiti uchun olingan natijalardan foydalanib ikkita Dispersion tenglama hosil qilindi. Ularni yechib yangi burilish to‘lqini mavjudligi topildi. Buning uchun quyidagicha qattiq mahkamlanganlik sharti qo‘yildi.

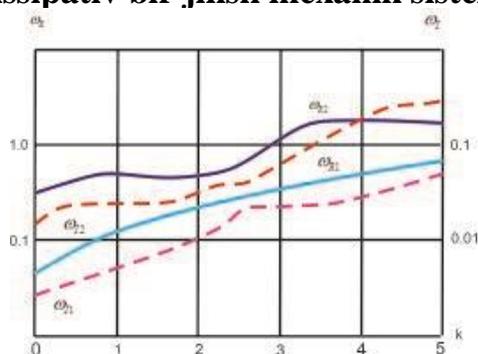
$$\begin{aligned}
 \sigma_{zx}^{(1)} \Big|_{z=0} &= g \sigma_{zx}^{(2)} \Big|_{z=0}, \sigma_{zz}^{(1)} \Big|_{z=0} = g \sigma_{zz}^{(2)} \Big|_{z=0}, \\
 u_z^{(1)} \Big|_{z=0} &= u_z^{(2)} \Big|_{z=0}, u_x^{(1)} \Big|_{z=0} = u_x^{(2)} \Big|_{z=0}, \\
 \mu_{zx}^{(1)} \Big|_{z=0} &= g_1 \mu_{zx}^{(2)} \Big|_{z=0}, \mu_{zz}^{(1)} \Big|_{z=0} = g_1 \mu_{zz}^{(2)} \Big|_{z=0}, \\
 \omega_z^{(1)} \Big|_{z=0} &= \omega_z^{(2)} \Big|_{z=0}, \omega_x^{(1)} \Big|_{z=0} = \omega_x^{(2)} \Big|_{z=0}.
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Bu masalada ham bir biriga bog‘liq bo‘lmagan ikkita Dispersion tenglama olindi. Olingan Dispersion tenglama ikkinchi bobda keltirilgan Myuller usuli bilan yechiladi. Faza tezlikni to‘lqin soniga bog‘liq o‘zgarishi 8-rasmda keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki to‘lqin soni oshishi bilan faza tezligi asimptotaga intilar ekan. Uchinchi bob bo‘yicha xulosalar qilingan. Sirt to‘lqinlarini Kossera muhitida tarqalishini ifodalovchi tebranishlar chastotasi va faza tezligini topish masalasini yechish metodikasi va algoritmi ishlab chiqildi. Sirt to‘lqinlarini faza tezligi va chastotasi orasidagi munosabati qurildi. Reley to‘lqinini dispersiyaga uchrash sohasi topildi. Olingan

natijalarni klassik elastiklik yoki qovushqoqlik nazariyasi masalalari bilan solishtirildi. Simmetrik bo‘lmagan nazariya qo‘llaganda plastinkada Lemb to‘lqinidan tashqari yangi to‘lqin paydo bo‘lganligi bilan klassik nazariyadan farqlanadi. Qovushqoqlik xossasini hisobga olish faza tezligini haqiqiy qismini 5% gacha kamaytirar ekan. Faza tezligini mavhum qismi esa to‘lqin soniga bog‘liq oshib borar ekan. Dissertatsiyaning “**Garmonik to‘lqinni qatlamli Kossera qovushqoq-elastik muhitida tarqalishi**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida garmonik xos to‘lqinlarni ko‘p qatlamli Kossera muhitida tarqalishi ko‘rib chiqiladi. (8- rasm).



8-rasm. Chastotani haqiqiy qismini o‘lchamsiz to‘lqin soni k ga bog‘liq o‘zgarishi (dissipativ bir jinsli mexanik sistema)



9-rasm. Chastotani haqiqiy qismini o‘lchamsiz to‘lqin soni k ga bog‘liq o‘zgarishi (dissipativ bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistema).

Erkin to‘lqinni Kossera qovushqoq-elastik muhitida tarqalishi masalasi yechilgan va sonli natijalar olinib tahlil qilingan. Misol sifatida yarim qovushqoq-elastik muhitida yotgan qatlamda to‘lqin tarqalishi masalasi o‘rganilgan. Sonli natijalar ikkinchi bobda keltirilgan algoritm, ya’ni Myuller, Laplas va Gauss usullari asosida olingan. (bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistema uchun). Bu yerda ham oltinchi tartibli ikkita matritsa olindi. Chastotani ikkita eng kichik modasini to‘lqin soniga bog‘liq o‘zgarishi dissipativ bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistema uchun o‘rganildi. Natijalar 8 va 9-rasmlarda keltirilgan. Chastotani haqiqiy qismini o‘lchamsiz to‘lqin soni ξ ga bog‘liq o‘zgarishi monoton funksiya bilan ifodalanishi topilgan. Chastotani haqiqiy va mavhum qismini o‘lchamsiz to‘lqin soniga bog‘liq o‘zgarishi monotonlik xususiyatiga ega ekanligi topildi. Ularni o‘zgarish xarakteri (haqiqiy va mavhum qismini) deyarli bir xil bo‘lar ekan. Lekin dissipativ bir jinsli bo‘lmagan (yarim elastik tekislik) mexanik sistema uchun chastotani mavhum qismini o‘lchamsiz to‘lqin soniga bog‘liq o‘zgarishi nomonotonlik (monoton bo‘lmagan) xususiyatiga ega ekanligi topildi. Bir jinsli mexanik sistemaning va dissipativ bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistemalarda chastotani haqiqiy qismlarini to‘lqin soniga bog‘liq o‘zgarishidagi farqi 5% bo‘lar ekan. Bundan erkinlik darajasi chekli dissipativ mexanik sistema uchun topilgan “Trojanovskiy-

Safarov” samarasi Kossera muhiti uchun ham o‘rinli bo‘lishi aniqlandi. Xuddi shunday natijalar sirpanuvchi kontakt bo‘lgan holat uchun ham olindi. Olingan natijalar qattiq mahkamlanganlik holati uchun olingan natijalar bilan bir xil harakterga ega ekanligi va qatlamda to‘lqin tarqalishini ifodalovchi faza tezlikni to‘lqin uzunligiga bog‘liq o‘zgarishi keltirilgan, natijalar farqi 10- 15% bo‘lishi topilgan. Sonli natijalar ikkita chekli qatlam uchun ham olindi. To‘rtinchi bob bo‘yicha xulosalar qilingan. Dissipativ bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistemasida to‘lqin tarqalishi muammosini hal qilish jarayonida faza tezligi tizimning fiziko-mexanik va geometrik parametrlariga monoton bo‘lmagan bog‘liqligi aniqlangan. Dampfirlash koeffitsiyenti tizimning fizik, mexanik va geometrik parametrlariga bog‘liqligi topildi. Guruh tezligi hech qachon faza tezligidan oshmaydi. Shuningdek, dispersiya bo‘lmagan muhitda guruh tezligini aniqlandi. Dispersiya muhitga nisbatan 10-15% yuqori. Boshqacha qilib aytadigan bo‘lsak, impulslarning tarqalish shakllari bir xil elastik jismlardagi kabi o‘zgarishsiz qolmasligi aniqlandi.

UMUMIY XULOSALAR

1. Deformatsiyalanuvchi (qovushqoq-elastik) Kossera muhitdan iborat bir , ikki va ko‘p qatlamli to‘lqin o‘tkazgichga turli xil kontakt shartlari bajarilganda xos to‘lqinlar tarqalishini o‘rganish metodikasi, algoritmi va dasturi ishlab chiqilgan.

2. Kossera muhitidan tashkil topgan uzun qatlamli mexanik sistemada garmonik yuklanishlar ta’sirida hosil bo‘ladigan kuchlanish deformatsiya holatini topish metodikasi va algoritmi ishlab chiqildi.

3. Sirt to‘lqinlarini Kossera muhitida tarqalishini ifodalovchi tebranishlar chastotasi va faza tezligini topish masalasini yechish metodikasi va algoritmi ishlab chiqildi. Sirt to‘lqinlarni faza tezligi va chastotasi orasidagi munosabat qurildi. Reley to‘lqinini dispersiyaga uchrash sohasi topildi. Olingan natijalarni klassik elastiklik yoki qovushqoqlik nazariyasi masalalari bilan solishtirildi.

4. Simmetrik bo‘lmagan nazariya qo‘llaganda plastinkada Lemb to‘lqinidan tashqari yangi to‘lqin paydo bo‘lganligi bilan klassik nazariyadan farqlanadi. Qovushqoqlik xossasini hisobga olish faza tezligini haqiqiy qismini 5% gacha kamaytirar ekan. Faza tezligini mavhum qismi esa to‘lqin soniga bog‘liq oshib borar ekan.

5. Dissipativ bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistemasida to‘lqin tarqalishi muammosini yechish jarayonida faza tezligi tizimning fizik, mexanik va geometrik parametrlariga monoton bo‘lmagan bog‘liqligi topildi.

6. Guruh tezligi hech qachon faza tezligidan oshmasligi topildi. Dispersiya bo‘lmagan muhitda guruh tezligi dispersiya bo‘ladigan muhitga nisbatan 10-15% yuqori bo‘lishi topildi.

7. Dissipativ bir jinsli va bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistemalar uchun xos tebranishlar, hamda majburiy tebranishlar uchun olingan natijalar bir-birini to‘ldirishi topildi. Dissipativ mexanik sistema majburiy tebranishlar amplitudasini global rezonans amplitudasi orqali baholanishi va dissipativ bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistema uchun nomonoton o‘zgarishi topildi.

8. Rezonans amplitudasini o‘rganish uchun global rezonans amplitudasi tushunchasi kiritildi va fizik mohiyati sonli eksperiment yordamida asoslab berildi. Dissipativ mexanik sistema majburiy tebranishlar amplitudasini global rezonans amplitudasi orqali baholanishi va dissipativ bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistema uchun nomonoton o‘zgarishi topildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2021.FM.101.02
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ БУХАРСКОМ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

**КАРШИНСКИЙ ФИЛИАЛ ТАШКЕНТСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИМЕНИ
МУХАММАДА АЛ-ХОРАЗМИЙ**

САИПНАЗАРОВ ЖОНИБЕК МУХАММАДИЕВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЛН В
ВОЛНОВОДАХ, СОСТОЯЩИХ ИЗ СРЕДЫ КОССЕРЫ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

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

Бухара – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей Аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2023.2.PhD/FM881

Диссертация выполнена в Каршинском филиале Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Бухарского инженерно-технологического института (www.buxmti.uz) и на Информационно образовательном портале "ZiyoNet" (www.ziyo.net).

Научный руководитель:	Сафаров Исмоил Иброхимович доктор физико-математических наук, профессор.
Официальные оппоненты:	Мардонов Ботир Мардонович доктор физико-математических наук, профессор Мирзаев Ибрахим доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Наманганский инженерно-технологический институт

Защита диссертации состоится 5 апреля 2025 г. в 09⁰⁰ часов на заседании Научного совета Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 при Бухарском инженерно-технологическом институте (Адрес: 100118, г.Бухара, ул. Каюма Муртазаева 15. Тел.: (+998-65) 223-78-84; факс: (+998-65) 223-78-84, e-mail: bmti_info@edu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарского инженерно-технологического института (зарегистрирована за № 459). (Адрес: 100118, г.Бухара, ул.Каюма Муртазаева 15. Тел.: (+99865) 223-78-84;).

Автореферат диссертации разослан 14 марта 2025 года.

(Протокол рассылки № 10 от 4 декабря 2024 г.)



М.Х. Тешаев.

Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук (DSc)

З.И. Болтаев

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук (DSc), профессор

М.З. Шарипов

Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук (DSc), профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире при проведении научных исследований в более чем ста научно-исследовательских учреждениях по изучению проблемы распространения волн в волноводах, состоящих из упругих и вязких каменистых сред применение свойств грунтовых сред занимает одно из ведущих мест. В связи с тем, что наземные и подземные сооружения в мировом масштабе находятся под воздействием различных квазистатических и динамических сейсмических волн, в целях обеспечения их прочности и изучения динамических напряжений и деформаций, возникающих в упругих и вязкоупругих элементах, являющихся составной частью конструкций сооружений, требуется внедрение в практику динамики и методов распространения волн в них. В связи с этим в условиях глобализации и интенсификации процесса обмена информацией важное значение приобретает использование эффективных средств в конструкциях наземных и подземных сооружений.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на повышение прочности материалов, применяемых в области сейсмостойкости наземных и подземных сооружений, в том числе многослойных конструкций со сложным составом и физическими свойствами, а также пластинчатых конструкций. В связи с этим достигнуты значительные результаты в решении динамических задач при повышении сейсмостойкости сооружений с учетом вязкоупругих свойств материала, в частности, особое внимание уделяется оценке динамического напряженно-деформированного состояния сооружений с учетом напряжений и их моментов, возникающих в результате распространения сейсмических волн в грунтовой среде.

В нашей Республике снижение негативного воздействия микроколебаний, возникающих в процессе распространения волн, повышение прочности деталей и устройств имеет важное научно-практическое значение, в связи с широким применением современной техники и технологий для конструкционных материалов с уникальными физико-механическими свойствами проводятся широкомасштабные мероприятия по созданию методики изучения свойств распространения волн в пластинчатых и цилиндрических вязкоупругих оболочках, контактирующих со средой, и достигнуты определенные результаты. В Указе Президента Республики Узбекистан от 29 октября 2020 года "Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года" определены задачи, в частности, "...широкое использование научно-инновационного потенциала, определение приоритетных направлений систематического реформирования науки в будущем, подготовка высококвалифицированных кадров, обладающих современными знаниями и независимым мышлением..."². При выполнении этих задач, в том числе в задачах колебаний трехслойных пластин, взаимодействующих с деформируемой средой, важное значение имеет устранение биений в резонансной области.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлении Президента Республики

² Указ Президента Республики Узбекистан № ПФ-6097 "Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года" от 29 октября 2020 года

Узбекистан No ПП-4794 от 30 июля 2020 года "О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан," Постановлении Президента Республики Узбекистан No ПП-4708 от 7 мая 2020 года "О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области математики" а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование является IV этапом развития республиканской науки и инновационных технологий. Оно проводилось в рамках приоритетного направления «Математика, механика, сейсמודинамика сооружений и информатика» и XIV «Сейсмология, сейсмическая безопасность зданий и сооружений и сооружений»

Степень изученности проблемы. Разработка несимметричной теории упругости (среды Коссера) началась в 50-х годах прошлого столетия. В теории несимметричной упругости проблема динамического напряжения-деформирования тел, контактирующих с волноупругой средой, с научной точки зрения выполнена зарубежными учеными, такими как Новацкий В., Костер В.Т., Аэро Э.Л., Кувшинский Е.В., Миндлин Р.Д., Тирстен Г.Ф., Тупин Р.А., Кунин И.А., Пальмов В.А., Лурье А.И., Победре Б.Е., Матвеев В.П., Кулешу М.А., Бровко Г.А., Rajneesh Kumar, Jun Liu, Nistor I., Suiker A.S. и другими учеными. Ученые нашей республики Рахматулин Х.А., Урозбоев М.Т., Кабулов В.К., Рашидов Т.Р., Мубораков Я.Н., Мирсаидов М.М., Мардонов Б.М., Султонов К.С., Мирзаев И.К., Абдукадиров С., Худойназаров Х., Юлдашов Ш.С., Сафаров И.И. и другие ученые провели работы по изучению и оценке распространения волн в грунтовой среде и напряженно-деформационных состояниях среды. Они внесли значительный вклад в развитие методов расчета волновых нагрузок на пластинчатые, цилиндрические или сферические тела, контактирующие с окружающей средой.

В настоящее время не до конца разработаны методы оценки характеристик и динамического состояния распространения собственных волн в среде Коссера с учетом вязкостных свойств и неоднородных свойств среды.

Связь диссертационного исследования с научными планами высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Каршинского филиала Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий.

Целью исследования является разработка методики и программы расчетов, направленных на оценку характеристического распространения и затухания волн в полуплоских, слоистых и двухслойных волноводах, состоящих из вязкоупругой среды Коссера, напряженно-деформированного состояния среды и результирующего резонансного состояния, а также совершенствование аналитических и численных методов расчета.

Задачи исследования:

разработка математической постановки, методики решения и алгоритма исследования свойств распространения и затухания волн в волноводах, состоящих из вязкоупругой среды Коссера;

сравнительная оценка скорости распространения волн Рэлея и Стоунли при контакте двух сред на полуплоской поверхности, состоящей из вязкоупругой среды Коссера, и их затухания;

сравнительная оценка характеристик распространения и затухания волн в волноводах, состоящих из вязкоупругой среды Коссера, в длинных волноводах, изменение нескольких мод комплексной фазовой скорости в зависимости от волнового числа и на основе полученных результатов параметрическая оценка затухания волн;

исследование фазовой скорости и затухания новой волны, возникающей в вязкоупругой среде Коссера, отличной от идеально упругой среды.

Объектом исследования выбрано тело (или волновод), состоящее из вязкоупругой полуплоскости, слоя и двухслойной среды Коссера.

Предметом исследования является процесс определения напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик двухслойного вязкоупругого волновода, деформируемого под воздействием гармонических волн, с учетом реологических свойств материалов.

Методы исследования. В процессе исследований использовались методы механики деформируемого твердого тела и строительной механики, вычислительной математики, математического моделирования, методы программирования, «замораживания» решения уравнений в частных производных, разделения переменных, методов Гаусса, Лапласа и конечных разностей.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые получены интегро-дифференциальные уравнения распространения волн в многослойных волноводах, состоящих из вязкоупругой среды Коссера, на основе метода вывода уравнений Навье и Ламе теории упругости, разработаны методика и алгоритм их решения с использованием методов теории волновой динамики;

на поверхности полуплоскости, состоящей из вязкоупругой среды Коссера, найдены и сравнительно оценены зависимости скорости распространения и затухания волн Рэлея и Стоунли при контакте двух сред от частоты, отличающейся от классической среды, т.е. эффект усиления для высоких частот;

на основе анализа численных результатов найдено изменение мод комплексной фазовой скорости относительно волнового числа в протяженных волноводах, состоящих из диссипативно-неоднородной двухслойной вязкоупругой среды Коссера, через немонотонные функции и соответственно оценен параметр, представляющий затухание волны;

на основе применения методов волновой теории было обнаружено, что с учетом внутренних напряжений и моментов, действующих на частицы вязкоупругой среды Коссера, в отличие от классической упругой среды, при распространении волн существуют два дисперсионных соотношения.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

проведено сравнение частоты распространения волны и коэффициентов затухания, образующихся в слое, контактирующем с деформируемой полуплоскостью, под воздействием гармонической волны;

сравнительная оценка частоты распространения волн и коэффициентов

затухания в двухслойном волноводе под воздействием гармонической волны;

оценены скорость распространения и свойства резонансной генерации новой волны, отличной от классической упругой среды, в каменистой среде под действием продольных и поперечных волн.

Достоверность результатов исследования обоснована корректной постановкой граничных условий, жесткостью математических выражений, систематическим использованием основанных на них методов решения, сравнением с решениями других исследователей при оценке точности решений и их соответствии полученными результатами, а также их внедрением.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований объясняется вкладом в развитие и совершенствование теории динамики волн и дифракции, образующихся в слоистой среде, контактирующей с деформируемой средой.

Практическая значимость результатов исследований заключается в разработке комплекса практических программ, предназначенных для построения формы распространения волн и колебаний в волноводах, состоящих из двухслойной вязкоупругой среды Коссера. Комплексное частотно-зависимое исследование вязкоупругого распространения поверхностных волн в полуплоскости Коссера позволяет оптимизировать распространение сейсмических волн и их воздействие на конструкции, а также возникающие напряжения и деформации.

Внедрение результатов исследований. На основе научных результатов исследований характеристик распространения гармонических волн в волноводах, состоящих из среды Коссера:

методики и алгоритмы расчета моментов напряжений в оболочке использовано в фундаментальном проекте ОТ-F4-04(05) "Применение спектрального метода решения материально нелинейных эволюционных уравнений. Биомеханика сосудистой системы сердца", выполненном в Ургенчском государственном университете в 2017-2020 гг. (Справка Ургенчского государственного университета от 26 сентября 2024 г. № 04-04/01-11/4072). В результате появилась возможность рассчитать моментные напряжения, создаваемые в стенках за счет протекания жидкости по тонким вязкоупругим кровеносным сосудам;

методы определения резонансных областей, образующихся при распространении собственных волн, образующихся на поверхности трубы и в среде использовано в фундаментальном научно-техническом проекте № ОТ-F4-01 на тему: "Развитие теории и разработка методов расчета напряженно-деформируемых состояний криволинейных участков многослойных композитных труб, протекающих вязкой жидкостью под действием температурных и динамических нагрузок", выполненном 2016-2020 годах в Ташкентском химико-технологическом институте (Справка Ташкентского химико-технологического института от 14 сентября 2024 года № 1/04-2380). Результат позволил предсказать и оценить резонансные области при распространении волн в многослойных композитных средах.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены и одобрены на международных и республиканских

конференциях, в том числе на 3 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Всего по теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 7 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан к публикации основных научных результатов диссертаций доктора философии (PhD), из которых 4 статьи в республиканских и 3 статьи в международных журналах.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и необходимость диссертации, выявлены цель и задачи, объект и предмет исследования. определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования. Обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость. Даны сведения о внедрении результатов исследования, апробации, опубликованных работах и о структуре диссертации.

Первая глава диссертации под названием «**Анализ литературы по распространению гармонических волн в вязкоупругой среде Коссера**» состоит из трех параграфов, в первом параграфе из которых дан краткий анализ работ, посвященных проблеме распространения волн в безмоментных упругих средах и телах. Обобщенная теория несимметричной упругости была разработана братьями Коссера в 1910 году. В классической теории упругости состояние деформации среды оценивается деформацией точки или перемещением точки. Согласно модели, предложенной братьями Коссера, смещение каждой точки изображается ортогональным треугольником, также каждая точка среды рассматривается как абсолютное твердое тело. При получении этой модели помимо тензора напряжения в среде появляется тензор моментных напряжений, причем тензоры не являются осесимметричными. После Коссера Трусдел, Кувшинский, Аэро, Пальмов, Новацкий, Тюпин и другие внесли большой вклад в развитие этой теории. Ученые предложили упрощенные случаи этой модели, один из которых называется псевдоконтинуумом Коссера. Они $\vec{\theta} = \frac{1}{2} rot \vec{u}$

приняли как вектор вращения. В этом случае задача сводится к классической теории упругости. Во втором параграфе представлен краткий анализ литературы, посвященной изучению распространения свободных (или собственных) волн в полуплоскости, состоящей из среды Коссера. В третьем параграфе представлен анализ литературы, посвященной изучению проблемы распространения волн в грунтах или среде, окружающей скважину. Обобщён анализ и приведены выводы. Согласно этим выводам, не найдено дисперсионное уравнение, описывающее распространение волн в вязкоупругой среде Коссера, также не разработаны методология и алгоритм его решения; не найдено в обобщённом

виде уравнение распространения волн в цилиндрической оболочке в вязкоупругой среде, не разработаны методика и алгоритм его решения; не поставлены граничная задача выводящая распространение волн и результирующая спектральная задача, не разработаны методика и алгоритм решения; из результатов анализа литературы следует, что не придано достаточное внимание изучению колебаний частиц в среде теории момента (или Коссера). На основании этих выводов была определена цель диссертационной работы и поставлены задачи, соответствующие этой цели.

Вторая глава диссертации под названием «**Постановка задач распространения гармонических волн в волноводах, состоящих из среды Коссера, методология решения и алгоритм**», состоит из четырех параграфов, в которых представлена задача о распространении свободных волн в плоской среде с вязкоупругим слоем, методика и алгоритм решения. Пусть A — произвольная область, ограниченная гладкой поверхностью. dA - малый элемент, обозначим вектор силы через $\vec{p}dA$ и вектор момента через $\vec{m}dA$. Также обозначим векторы: X – объемная сила и Y – объемный момент. Дифференциальное уравнение движения объемного элемента V , выделенного из области получено на основе вариационного принципа

$$\int_A p_i dA + \int_V X_i dV = 0, \quad (1)$$

$$\int_A (\epsilon_{ijk} x_i p_k + m_i) dA + \int_V (\epsilon_{ijk} x_i X_k + Y_i) dV = 0; i, j, k = 1, 2, 3.$$

Модель среды для уравнений (1) приведены на рис.1.



Рис.1. Модель среды Коссера

$$p_i(n) = \sigma_{ji} n_j, m_i(n) = \mu_{ji} n_j. \quad (2)$$

Из первого уравнения приведённого в (1) получим следующее уравнение

$$\int_V (\sigma_{ji,j} + X_i) dV = 0. \quad (3)$$

Из второго уравнения приведённого в (1) получим следующую систему уравнений

$$\int_V [\epsilon_{ijk} x_j (\sigma_{ik,i} + X_k) + \epsilon_{ijk} \sigma_{ik} + \mu_{ij,j} + Y_i] dV = 0. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) получаются следующая система уравнений

$$\sigma_{ji,j} + X_i = \rho \ddot{u}_i, \quad (5)$$

$$\epsilon_{ijk} \sigma_{jk} + \mu_{ij,j} + Y_i = j \ddot{\theta}_i,$$

где ρ - плотность материала.

Пусть A — произвольная область, ограниченная гладкой поверхностью.

Взаимосвязь или базовая физическая связь между напряжениями и

деформациями имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= 2\tilde{\mu}\gamma_{(ij)} + 2\tilde{\alpha}\gamma_{(ij)} + \tilde{\lambda}\gamma_{kk}\delta_{ij}, \\ \mu_{ij} &= 2\tilde{\gamma}\chi_{(ij)} + 2\tilde{\varepsilon}\chi_{(ij)} + \beta\chi_{kk}\delta_{ij}.\end{aligned}$$

где $\tilde{\mu}_k, \tilde{\lambda}_k, \tilde{\alpha}_k, \tilde{\beta}_k, \tilde{\gamma}_k, \tilde{\varepsilon}_k$ – соответственно коэффициенты оператора Ламе и параметры оператора упругости в среде Коссера, которые выражаются в следующем виде

$$\begin{aligned}\tilde{\gamma}_k f(t) &= \gamma_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\gamma}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \quad \tilde{\varepsilon}_k f(t) = \varepsilon_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\varepsilon}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \\ \tilde{\lambda}_k f(t) &= \lambda_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\lambda}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \quad \tilde{\mu}_k f(t) = \mu_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\mu}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \\ \tilde{\alpha}_k f(t) &= \alpha_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\alpha}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \quad \tilde{\beta}_k f(t) = \beta_{k0} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{k\beta}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right].\end{aligned}\quad (6)$$

где $\mu_{k0}, \lambda_{k0}, \alpha_{k0}, \beta_{k0}, \gamma_{k0}, \varepsilon_{k0}$ - мгновенные параметры упругости для вязкоупругой среды Коссера, $R_{k\gamma}(t-\tau), R_{k\varepsilon}(t-\tau), R_{k\lambda}(t-\tau), R_{k\mu}(t-\tau), R_{k\alpha}(t-\tau), R_{k\beta}(t-\tau)$ -ядра релаксации. В первом параграфе представлены динамические вопросы и общие отношения. Часто для стационарных задач приведенное выше соотношение (6) также сводится к комплексной упругой модели вязкости. Эти модели эквивалентны для стационарных процессов. В этом параграфе приводятся общие соотношения при изучении динамических процессов в вязкоупругой конечнослойной среде (или структуре), состоящей из среды Коссера.

Предположим, что слоистая среда задана в декартовой системе координат. Рассмотрим вопросы распространения волн в этой среде. Схемы счетов представлены на рисунке 2. Основная цель — исследование распространения свободных волн в слоистой вязкоупругой среде Коссера. Дифференциальное уравнение движения среды Коссера получается следующим образом:

$$\begin{aligned}(2\tilde{\mu}_k + \tilde{\lambda}_k) \text{grad div } \vec{u} - (\tilde{\mu}_k + \tilde{\alpha}_k) \text{rot rot } \vec{u} + 2\tilde{\alpha}_k \text{rot } \vec{\theta} + \vec{X}_k &= \rho_k \ddot{\vec{u}}, \\ (\tilde{\beta}_k + 2\tilde{\gamma}_k) \text{grad div } \vec{\theta} - (\tilde{\gamma}_k + \tilde{\varepsilon}_k) \text{rot rot } \vec{\theta} + 2\tilde{\alpha}_k \text{rot } \vec{u} - 4\tilde{\alpha}_k \vec{\theta} + \vec{Y}_k &= j_k \ddot{\vec{\theta}},\end{aligned}\quad (7)$$

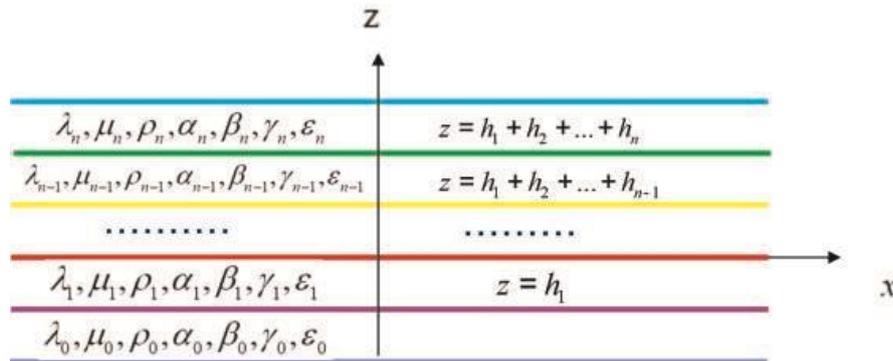


Рис.2. Многослойная среда, установленная на полуплоскости

ρ_k - плотность материала, j_k - плотность момента инерции, \vec{X}_k - вектор плотности объёмной силы, \vec{Y}_k - вектор плотности объёмного момента. Если в полуплоскости,

состоящей из среды Коссера, наблюдается распространение свободной волны или волны Рэлея, то граничные условия (напряжения и моментные напряжения) находятся следующим образом, т.е. напряжения и моментные напряжения равны нулю:

$$\begin{aligned}\sigma_{zx} &= 0, \sigma_{zy} = 0, \sigma_{zz} = 0, \\ \mu_{zx} &= 0, \mu_{zy} = 0, \mu_{zz} = 0.\end{aligned}\quad (8)$$

Здесь ось z перпендикулярна плоскости, а оси x и y направлены вдоль горизонтальной плоскости. Если две полуплоскости твёрдо закреплены или соединены, то на контакт накладывается условие твёрдого закрепления (рис.2).

$$\begin{aligned}\sigma_{zx1} &= \sigma_{zx2}, \sigma_{zy1} = \sigma_{zy2}, \sigma_{zz1} = \sigma_{zz2}, \\ \mu_{zx1} &= \mu_{zx2}, \mu_{zy1} = \mu_{zy2}, \mu_{zz1} = \mu_{zz2}, \\ u_{x1} &= u_{x2}, u_{y1} = u_{y2}, u_{z1} = u_{z2}, \\ W_{x1} &= W_{x2}, W_{y1} = W_{y2}, W_{z1} = W_{z2}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{zx1} &= \sigma_{zx2}, \sigma_{zy1} = \sigma_{zy2}, \sigma_{zz1} = \sigma_{zz2}, \\ u_{x1} &= u_{x2}, u_{y1} = u_{y2}, u_{z1} = u_{z2}, \\ \mu_{zx2} &= 0, \mu_{zy2} = 0, \mu_{zz2} = 0, \\ W_{x2} &= 0, W_{y2} = 0, W_{z2} = 0.\end{aligned}\quad (9)$$

Рекомендация модели вязкоупругой среды Коссера для такой многослойной среды является рекомендацией новой модели - вязкоупругой среды Коссера. Основная цель – решить новые задачи на основе предложенной модели, сравнить полученные численные результаты с задачами классической теории упругости. Во втором параграфе представлены методика и алгоритм решения задачи о распространении волн в телах, приводящих к плоской задаче. Изучено распространение собственных гармонических волн в волноводах, состоящих из слоистой длинной пластинчатой вязкоупругой (диссипативной однородной и неоднородной) среды Коссера.

В результате применения метода замораживания полученное выше интегродифференциальное уравнение (7) приходит к уравнению в частных производных с комплексными коэффициентами

$$\begin{cases} (2\bar{\mu}_n + \bar{\lambda}_n) \text{grad div} \bar{u}_n - (\bar{\mu}_n + \bar{\lambda}_n) \text{rot rot} \bar{u}_n + 2\bar{\alpha}_n \text{rot} \bar{\theta}_n + \bar{X}_n = \rho_n \frac{\partial^2 \bar{u}_n}{\partial t^2}, \\ (\bar{\beta}_n + 2\bar{\gamma}_n) \text{grad div} \bar{\theta}_n - (\bar{\gamma}_n + \bar{\varepsilon}_n) \text{rot rot} \bar{\theta}_n + 2\bar{\alpha}_n \text{rot} \bar{u}_n - 4\bar{\alpha}_n \bar{\theta}_n + \bar{Y}_n = j_n \frac{\partial^2 \bar{\theta}_n}{\partial t^2}. \end{cases}\quad (10)$$

здесь

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_n f(t) &= \lambda_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\lambda}^{(c)} - i\Gamma_{n\lambda}^{(s)} \right] f(t), \quad \bar{\mu}_n f(t) = \mu_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\mu}^{(c)} - i\Gamma_{n\mu}^{(s)} \right] f(t), \\ \bar{\alpha}_n f(t) &= \alpha_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\alpha}^{(c)} - i\Gamma_{n\alpha}^{(s)} \right] f(t), \quad \bar{\beta}_n f(t) = \beta_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\beta}^{(c)} - i\Gamma_{n\beta}^{(s)} \right] f(t), \\ \bar{\gamma}_n f(t) &= \gamma_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\gamma}^{(c)} - i\Gamma_{n\gamma}^{(s)} \right] f(t), \quad \bar{\varepsilon}_n f(t) = \varepsilon_{n0} \left[1 - \Gamma_{n\varepsilon}^{(c)} - i\Gamma_{n\varepsilon}^{(s)} \right] f(t).\end{aligned}$$

Полученное выше дифференциальное уравнение с частным производным комплексным коэффициентом сводится к системе дифференциальных уравнений

с комплексным коэффициентом и решается аналитически. В диссертации разработан метод аналитического решения. Общее решение уравнения (10) находим в виде интеграла Фурье

$$\vec{u}_n(x, z, t) = \vec{U}_n(z)e^{i(kx - \omega t)}, \quad \vec{\theta}_n(x, z, t) = \vec{\Omega}_n(z)e^{i(kx - \omega t)} \quad (11)$$

где $U_n(z), \Omega_n(z)$ - амплитуда перемещения и момента. Если подставить (11) в уравнение (10), то получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений с комплексными коэффициентами

$$\begin{cases} (2\bar{\mu}_n + \bar{\lambda}_n) \text{grad div} \vec{U}_n - (\bar{\mu}_n + \bar{\lambda}_n) \text{rot rot} \vec{U}_n + 2\alpha_n \text{rot} \vec{\Omega}_n + \rho_n \omega^2 \vec{U}_n(z) = 0, \\ (\bar{\beta}_n + 2\bar{\gamma}_n) \text{grad div} \vec{\Omega}_n - (\bar{\gamma}_n + \bar{\varepsilon}_n) \text{rot rot} \vec{\Omega}_n + 2\alpha_n \text{rot} \vec{U}_n - 4\bar{\alpha}_n \vec{\theta}_n + j_n \omega^2 \vec{\Omega}_n = 0. \end{cases} \quad (12)$$

здесь

$$\begin{aligned} \vec{u}_n(x, z, t) &= \vec{U}_n \{ U_x(z), U_y(z), U_z(z) \} e^{i(kx - \omega t)}, \\ \vec{\theta}_n(x, z, t) &= \vec{\Omega}_n \{ W_x(z), W_y(z), W_z(z) \} e^{i(kx - \omega t)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Если подставить (13) в (12), то получим следующую систему простых дифференциальных уравнений. Используя вышеизложенное можно также написать решения $U_n(z), W_n(z)$

$$\begin{aligned} U_x(z) &= ikE_0 e^{-\eta_0 z} + E_1 \eta_1 e^{-\eta_1 z} + E_2 \eta_2 e^{-\eta_2 z}, \\ U_y(z) &= \frac{B-1}{2A^2 B} \left\{ D_1 \left(x_1 - \frac{\omega^2}{C_4^2} + \frac{4A^2 B}{B-1} \right) e^{-\xi_1 z} + D_2 \left(x_2 - \frac{\omega^2}{C_4^2} + \frac{4A^2 B}{B-1} \right) e^{-\xi_2 z} \right\}, \\ U_z(z) &= \eta_0 E_0 e^{-\eta_0 z} + irE_1 e^{-\eta_1 z} + ikE_2 e^{-\eta_2 z}, \\ W_x(z) &= ikD_0 e^{-\xi_0 z} + D_1 \xi_1 e^{-\xi_1 z} + D_2 \xi_2 e^{-\xi_2 z}, \\ W_y(z) &= \frac{B}{2} \left\{ E_1 \left(x_1 - \frac{\omega^2}{C_3^2} \right) e^{-\eta_1 z} + E_2 \left(x_2 - \frac{\omega^2}{C_3^2} \right) e^{-\eta_2 z} \right\}, \\ W_z(z) &= ikD_0 e^{-\xi_0 z} + ikD_1 e^{-\xi_1 z} + ikD_2 e^{-\xi_2 z}, \end{aligned} \quad (14)$$

здесь

$$\begin{aligned} \eta_0 &= \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{C_1^2}}, \quad \xi_0 = \sqrt{k^2 + \frac{4A^2 B C_4^2}{(B-1)C_5^2} - \frac{\omega^2}{C_5^2}}, \\ \eta_1 &= \xi_1 = \sqrt{k^2 - x_1}, \quad \eta_2 = \xi_2 = \sqrt{k^2 - x_2}, \\ x_{1,2} &= \frac{C_3^2 + C_4^2}{2C_3^2 C_4^2} \omega^2 - 2A^2 \pm \sqrt{\frac{(C_3^2 - C_4^2)^2}{4C_3^4 C_4^4} \omega^4 - \frac{2A^2 (C_2^2 C_3^2 - 2C_3^2 C_4^2 + C_2^2 C_4^2)}{C_2^2 C_3^2 C_4^2} \omega^2 + 4A^4}. \end{aligned}$$

На основе полученного решения решаются задачи распространения свободных или вынужденных (стационарных или гармонических, нестационарных) волн в среде Коссера. В третьем параграфе представлена задача о распространении волн в вязкоупругих диссипативных волноводах, состоящих из плоских слоев, и указан метод ее решения. В четвертом параграфе представлен общий алгоритм нахождения дисперсионного уравнения и получения численных результатов в структурах, состоящих из многослойной среды Коссера. Сделаны выводы о постановке задачи, методологии и алгоритме решения.

В третьей главе диссертации под названием «**Распространение поверхностных волн в полуплоскости, состоящей из вязкоупругой среды Коссера**», решены вопросы распространения поверхностных волн в вязкоупругой среде Коссера, приведены и проанализированы численные результаты. В основном мы будем рассматривать распространение волн Рэлея, Стоунли и Лява. Дисперсионное уравнение получено в аналитическом виде. Поскольку среда вязкоупругая, неизвестные в дисперсионном уравнении являются комплексными величинами. Трансцендентное уравнение с комплексными параметрами решается численно на основе методов Мюллера и Лапласа. Результаты, полученные при распространении волн в среде Коссера, сравниваются с решениями, полученными в классической теории упругости. В первом параграфе этой главы изучаются свойства распространения поверхностных волн Рэлея в вязкоупругой среде Коссера. Пусть граница полуплоскости свободна от напряжений, тогда

$$\sigma_{zx}|_{z=0} = 0, \sigma_{zy}|_{z=0} = 0, \sigma_{zz}|_{z=0} = 0, \mu_{zx}|_{z=0} = 0, \mu_{zy}|_{z=0} = 0, \mu_{zz}|_{z=0} = 0, \quad (15)$$

Если использовать полученное выше общее решение (14) и граничные условия (15), то получим систему алгебраических уравнений с однородными комплексными коэффициентами следующего вида. Для того, чтобы оно имело решение, основной определитель будет равен нулю.

$$\det \left[M_p(p_1, p_2, p_3) \right] = \begin{vmatrix} 2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2} & -2ikp_2 & -2ikp_3 \\ 2ikp_1 & 2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2} & 2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2} \\ 0 & p_2(A_m - \frac{\omega^2}{C_3^2}) & p_3(A_p - \frac{\omega^2}{C_3^2}) \end{vmatrix} = 0,$$

$$\det \left[M_t(p_1, p_2, p_3) \right] = \begin{vmatrix} \frac{2ik}{1-B} & p_2(2 + \frac{A_m C_4^2 - \omega^2}{2A^2 C_4^2}) & p_3(2 + \frac{A_p C_4^2 - \omega^2}{2A^2 C_4^2}) \\ ikp_1(1+C) & p_2^2 + k^2 C & p_3^2 + k^2 C \\ (\frac{C_5^2}{C_4^2} - C - 1)k^2 - p_1^2 \frac{C_5^2}{C_4^2} & ikp_2(1+C) & ikp_3(1+C) \end{vmatrix} = 0$$

где C – безразмерный параметр, $C = \frac{\gamma - \varepsilon}{\gamma + \varepsilon}$. Из первого уравнения получаем зависимость между волновым числом и частотой $k(\omega)$. Если дисперсионное уравнение записать открыто, то получим следующее уравнение

$$\sqrt{k^2 - x_1} \left(x_1 - \frac{\omega^2}{C_3^2} \right) \left((2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2})^2 - 4k^2 \sqrt{k^2 - x_2} \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{C_1^2}} \right) - \sqrt{k^2 - x_2} \left(x_2 - \frac{\omega^2}{C_3^2} \right) \cdot \left\{ (2k^2 - \frac{\omega^2}{C_2^2})^2 - 4k^2 \sqrt{k^2 - x_1} \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{C_1^2}} \right\} = 0. \quad (16)$$

Это уравнение является уравнением Рэлея. Если упростить второе дисперсионное уравнение (для составляющих перемещения u_y, θ_x, θ_z), то полученное уравнение дает связь между коэффициентами перемещения и вращения

$$E_1 = \frac{i(\omega^2 - 2k^2 C_2^2)(\omega^2 - x_2 C_3^2)}{2k C_2^2 C_3^2 (x_1 - x_2) \eta_1} E_0, E_2 = \frac{i(\omega^2 - 2k^2 C_2^2)(\omega^2 - x_1 C_3^2)}{2k C_2^2 C_3^2 (x_1 - x_2) \eta_2} E_0.$$

Используя их, можно найти смещение и вращение точек полуплоскости. Для релаксации ядра использовалось ядро Рижаницена-Колтунова $R(t) = A e^{-\beta t} / t^{1-\alpha}$ с трехпараметрическим слабым сингулярным свойством, где A, α, β - параметры, характеризующие реологические свойства материалов. Для расчетов были приняты следующие параметры:

$$A = 0.048, \beta = 0.05, \alpha = 0.1, \gamma = 1.936 \times 10^8 N, \varepsilon = 3.046 \times 10^9 N,$$

$$j = 10^3 kg / m^3, \lambda_0 = 2.8 \times 10^8 N / m^2, \mu_0 = 4 \times 10^9 N / m^2, \rho = 10^5 kg / m^3, \alpha = 4 \times 10^9 N / m^2$$

На рисунке 3 один корень дисперсионного уравнения находится путем присвоения корню ряда значений.

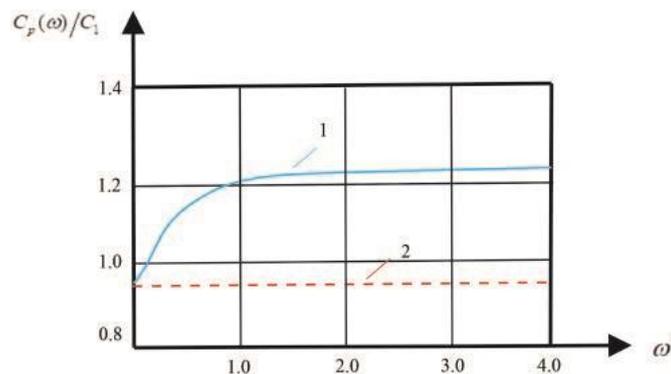


Рис.3. Частотно-зависимое изменение фазовой скорости при распространении волн Рэлея в вязкоупругой среде Коссера

Чтобы найти корень дисперсионного уравнения, находим точку пересечения функции с осью абсцисс, присваивая значение аргументу. Было обнаружено, что для абстрактной части фазовой скорости заперания (поглощения) не происходит. Частотно-зависимое изменение действительной части фазовой скорости (C_{ReR}^*) при распространении волны Рэлея в вязкоупругой среде полукоссера представлено на рис. 3.

Если среда является средой Коссера, то фазовая скорость зависит от волнового числа или частоты. Это актуально только для малых частот. С увеличением частоты дисперсия ослабевает и стремится к нулю. На основе полученных дисперсионных соотношений построена форма колебаний. Они представлены на рис.4.

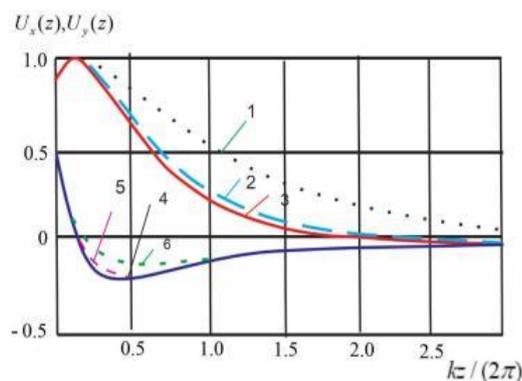


Рис.4. Изменение формы колебаний в зависимости от волнового числа

Таким образом, в этом пункте была установлена связь между фазовой скоростью и частотой поверхностных волн. Найдено поле дисперсии волн Рэлея. Полученные результаты сравнивались с задачами классической теории упругости или вязкости. Во втором параграфе настоящей главы решаются задачи распространения волн Лэмба и Стоунли при контакте двух сред на вязкоупругой пластине, состоящей из среды Коссера, и анализируются численные результаты. Волна Лэмба изучается на основе уравнений теории вязкоупругости. Это волна, которая зависит от толщины пластины, ее поверхности и физико-механических свойств пластины. Однако изучению материалов с учетом их вязкости уделяется мало внимания. Такие волны широко используются при обработке сигналов, изучении целостности материалов.

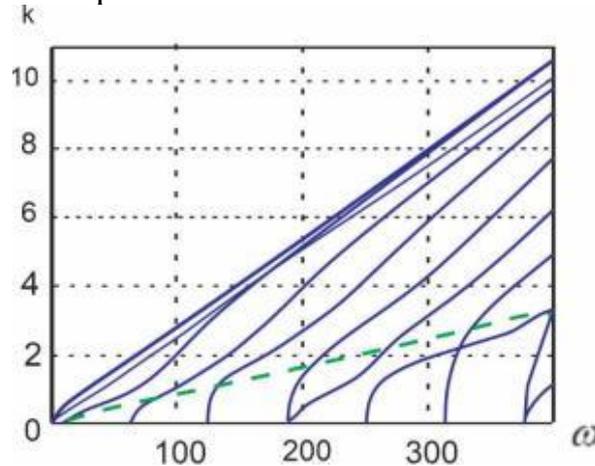


Рис.5. График дисперсионного уравнения, полученного из первого условия уравнения (17).

Решение, представляющее волну Лэмба, полученное для среды Коссера, считается общим решением и может использоваться для оценки распространения волн в других средах. Граничные условия для исследования волны Лэмба имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{zx}|_{z=\pm H} = 0, \sigma_{zy}|_{z=\pm H} = 0, \sigma_{zz}|_{z=\pm H} = 0, \\ \mu_{zx}|_{z=\pm H} = 0, \mu_{zy}|_{z=\pm H} = 0, \mu_{zz}|_{z=\pm H} = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Из (17) получаем два дисперсионных уравнения. Первый из них представляет собой распространение волны Лэмба по компонентам смещения u_x, u_z, θ_y . Второе уравнение аналогичным образом выражает закон дисперсии компонент смещения u_y, θ_x, θ_z и представляет собой закон дисперсии поперечной волны. Численные результаты представлены на рисунках 6 и 7.

$$A = 0.048, \beta = 0.05, \alpha = 0.1, \beta = 10^8 N, \gamma = 1.936 \times 10^8 N, \varepsilon = 3.046 \times 10^9 N,$$

$$j = 10^3 kg / m^3, \lambda_0 = 2.8 \times 10^8 N / m^2, \mu_0 = 4 \times 10^9 N / m^2, \rho = 10^5 kg / m^3, \alpha = 4 \times 10^9 N / m^2$$

В слое, динамическое поведение которого описывается моделью Коссера, кроме волны Лэмба видно, что существует совершенно новая волна с одной поперечной составляющей смещения – амплитудой. Видно, что эта волна также меняется в зависимости от глубины. Такого распространения волн не существует в классической теории упругости (рис. 5 и 6).

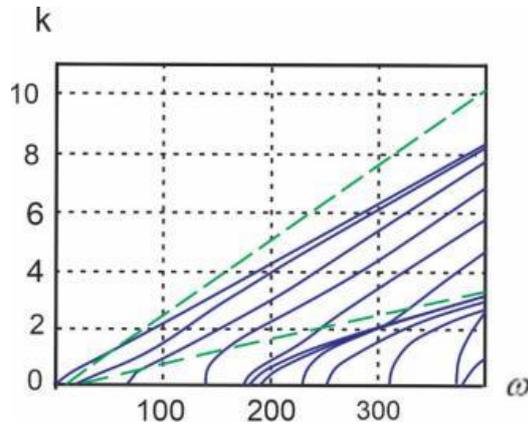


Рис.6. График дисперсионного уравнения, полученного из второго условия уравнения (17)

Пунктирные линии на рисунках представляют продольную и поперечную скорости соответственно. Таким образом, он отличается тем, что при применении несимметричной теории возникает новая волна. Учет свойства вязкости снижает реальную часть фазовой скорости до 5%. Абстрактная часть увеличивается в зависимости от количества волн.

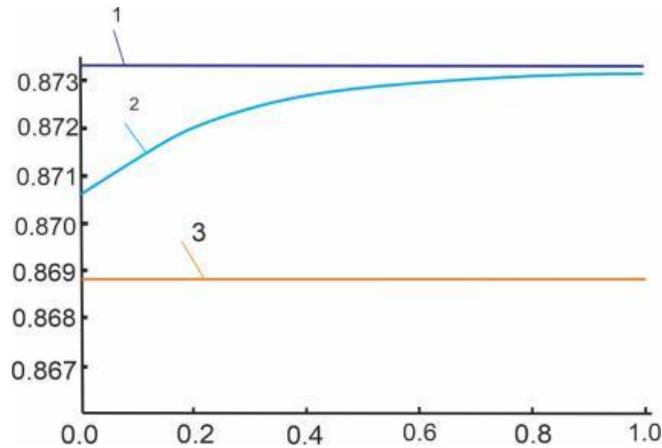


Рис.7. Изменение фазовой скорости в зависимости от волнового числа

Волна Стоунли образуется при сближении двух полуплоскостей. Каждая полуплоскость в отдельности удовлетворяет дифференциальному уравнению (1). Волна Стоунли рассматривается как недисперсионная нормальная волна в классической теории упругости. Волна Стоунли широко используется при исследовании прочности подземных сооружений, при исследовании состояния скважин, в сейсмологии и подобных областях.

Используя результаты, полученные выше для среды Коссера, были выведены два дисперсионных уравнения. Их решение выявило наличие новой вращающей волны. Для этого было наложено следующее условие прочности

$$\begin{aligned}
 \sigma_{zx}^{(1)} \Big|_{z=0} &= g \sigma_{zx}^{(2)} \Big|_{z=0}, \sigma_{zz}^{(1)} \Big|_{z=0} = g \sigma_{zz}^{(2)} \Big|_{z=0}, \\
 u_z^{(1)} \Big|_{z=0} &= u_z^{(2)} \Big|_{z=0}, u_x^{(1)} \Big|_{z=0} = u_x^{(2)} \Big|_{z=0}, \\
 \mu_{zx}^{(1)} \Big|_{z=0} &= g_1 \mu_{zx}^{(2)} \Big|_{z=0}, \mu_{zz}^{(1)} \Big|_{z=0} = g_1 \mu_{zz}^{(2)} \Big|_{z=0}, \\
 \omega_z^{(1)} \Big|_{z=0} &= \omega_z^{(2)} \Big|_{z=0}, \omega_x^{(1)} \Big|_{z=0} = \omega_x^{(2)} \Big|_{z=0}.
 \end{aligned} \tag{18}$$

В этой задаче также были получены два независимых дисперсионных уравнения. Полученное дисперсионное уравнение решается методом Мюллера, представленным во второй главе. Изменение фазовой скорости в зависимости от количества волн показано на рисунке 8. Видно, что с увеличением волнового числа фазовая скорость стремится к асимптоте. Сделаны выводы по третьей главе. Разработаны методика и алгоритм решения задачи нахождения частоты и фазовой скорости колебаний, представляющих собой распространение поверхностных волн в среде Коссера. Построена связь между фазовой скоростью и частотой поверхностных волн. Найдено поле дисперсии волн Рэлея. Полученные результаты сравнивались с задачами классической теории упругости или вязкости. Ее отличие от классической теории состоит в том, что при использовании несимметричной теории на пластинке помимо волны Лэмба возникает новая волна. Учет свойства вязкости снижает реальную часть фазовой скорости до 5%. Абстрактная часть фазовой скорости увеличивается в зависимости от волнового числа.

Четвертая глава диссертационной работы под названием «**Распространение гармонических волн в слоистой вязкоупругой среде Коссера**» посвящена распространению гармонических характеристических волн в многослойной среде Коссера (рис. 8).

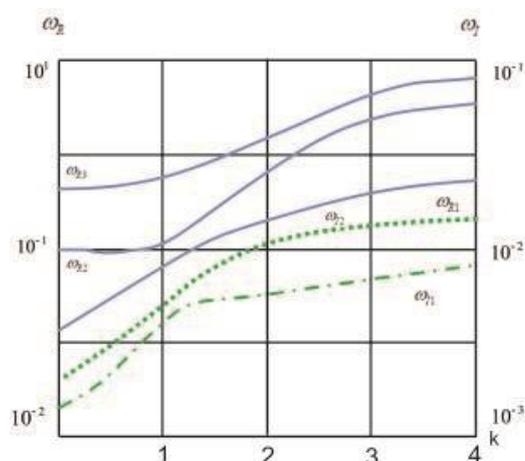


Рис.8. Изменение действительной части частоты в зависимости от безразмерного волнового числа k (диссипативная однородная механическая система)

Решена задача о распространении свободных волн в вязкоупругой среде Коссера, получены и проанализированы численные результаты. В качестве примера рассмотрена задача о распространении волн в слое, находящемся в полувязко-упругой среде. Численные результаты были получены на основе алгоритма, представленного во второй главе, то есть методов Мюллера, Лапласа и Гаусса (для неоднородных механических систем). Здесь также были получены две матрицы шестого порядка. Изучено изменение двух низших мод частоты в зависимости от волнового числа диссипативно-неоднородной механической системы. Результаты представлены на рисунках 8 и 9.

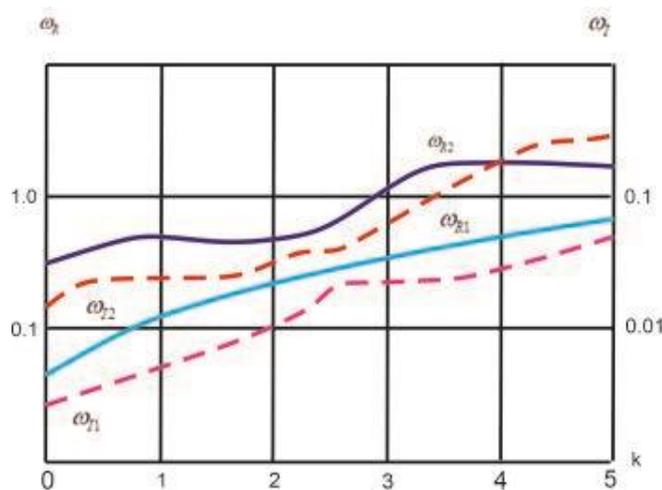


Рис.9. Действительная часть частоты зависит от безразмерного волнового числа k (диссипативная неоднородная механическая система)

Было обнаружено, что действительная часть частоты может быть представлена монотонной функцией, изменяющейся в зависимости от безразмерного волнового числа ξ . Установлено, что изменение действительной и абстрактной части частоты в зависимости от безразмерного волнового числа обладает свойством монотонности. Характер их изменения (реальная и абстрактная часть) практически одинаков. Однако для диссипативной неоднородной (плоской полуупругой) механической системы установлено, что изменение абстрактной части частоты в зависимости от безразмерного волнового числа имеет свойство немонотонности. Разница в изменении действительных частей частоты в зависимости от волнового числа в однородной механической системе и диссипативных неоднородных механических системах составляет 5%. Было обнаружено, что эффект Трояновского-Сафарова, обнаруженный для диссипативной механической системы с конечной степенью свободы, справедлив и для среды Коссеры. Аналогичные результаты были получены и для случая скользящего контакта. Полученные результаты носят тот же характер, что и результаты, полученные для случая жесткой фиксации, а изменение фазовой скорости, представляющей собой распространение волны в слое, в зависимости от длины волны, разница результатов оказывается равной 10-15%. Численные результаты были также получены для двух конечных слоев. Сделаны выводы по четвертой главе. В процессе решения задачи о распространении волн в диссипативной неоднородной механической системе было установлено, что фазовая скорость имеет немонотонную зависимость от физико-механических и геометрических параметров системы. Установлено, что коэффициент демпфирования зависит от физических, механических и геометрических параметров системы. Групповая скорость никогда не превышает фазовую скорость. Также была определена групповая скорость в недисперсионной среде. Дисперсия на 10-15% выше средней. Другими словами, было обнаружено, что характер распространения импульсов не остается таким, как в тех же упругих телах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методика, алгоритм и программа исследования распространения собственных волн при выполнении различных условий контакта

с одно-, двух- и многослойным волноводом, состоящим из деформируемой (вязкоупругой) среды Коссера.

2. Разработаны методика и алгоритм поиска напряженно-деформированного состояния, вызванного гармоническими нагрузками, в длиннослойной механической системе, состоящей из среды Коссера.

3. Разработаны методика и алгоритм решения задачи нахождения частоты и фазовой скорости колебаний, представляющих собой распространение поверхностных волн в среде Коссера. Установлена связь между фазовой скоростью и частотой поверхностных волн. Найдено поле дисперсии волн Рэлея. Полученные результаты сравнивались с задачами классической теории упругости или вязкости.

4. При применении несимметричной теории она отличается от классической теории тем, что на пластине помимо волны Лэмба возникает новая волна. Учет свойства вязкости снижает действительную часть фазовой скорости до 5%. Абстрактная часть фазовой скорости увеличивается в зависимости от волнового числа.

5. В процессе решения задачи о распространении волн в диссипативно-неоднородной механической системе обнаружена немонотонная зависимость фазовой скорости от физических, механических и геометрических параметров системы.

6. Установлено, что групповые скорости никогда не превышают фазовых скоростей. В недисперсионных средах групповые скорости оказались на 10-15% выше, чем в дисперсионных.

7. Установлено, что результаты, полученные для диссипативных однородных и неоднородных механических систем, характеристических колебаний и вынужденных колебаний, дополняют друг друга. Установлено, что амплитуду вынужденных колебаний диссипативной механической системы можно оценить через амплитуду глобального резонанса и немонотонное изменение для диссипативно-неоднородной механической системы.

8. С целью исследования резонансной амплитуды введено понятие глобальной резонансной амплитуды и обоснована ее физическая сущность с помощью численного эксперимента. Установлено, что амплитуду вынужденных колебаний диссипативной механической системы можно оценить по амплитуде глобального резонанса и немонотонному изменению диссипативно-неоднородной механической системы.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2021.FM.101.02
ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT BUKHARA
ENGINEERING-TECHNOLOGICAL INSTITUTE**

**KARSHI BRANCH OF TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION
TECHNOLOGIES NAMED AFTER MUHAMMAD AL-KHWARIZMI**

SAIPNAZAROV JONIBEK MUKHAMMADIEVICH

**FEATURES OF THE PROPAGATION OF HARMONIC WAVES IN
WAVEGUIDES CONSISTING OF A COSSERA MEDIUM**

01.02.04 – Mechanics of a deformable solid

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

Bukhara – 2025

The theme of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences was registered under No. B2023.2.PhD/FM881 by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan.

The dissertation has been accomplished at at Karshi branch of Tashkent University of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi

The dissertation abstract in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been placed on the website of Bukhara Engineering-Technological Institute (www.buxmti.uz) and on the Information-Educational portal "ZiyoNET" (www.ziynet.uz).

Scientific advisor: **Safarov Ismoil Ibrokhimovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Professor

Official Opponents: **Mardonov Botir Mardonovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Mirzayev Ibraxim
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Lead organization: **Namangan engineering-construction institute**

The dissertation defense will be held on 5th April 2025 y. at 09⁰⁰ o'clock at the meeting of Scientific Council Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 at Bukhara Engineering-Technological Institute. (Address: 100118, 15. Qayum Murtazaev street, Bukhara. Phone: (+99865) 223-78-84; fax: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz).

The dissertation is available at the Information resource center of Bukhara Engineering-Technological Institute (registered under the number No.459.). (Address: 100118, 15. Qayum Murtazaev street, Bukhara. Phone: (+99865) 223-78-84).

The disseretation abstract is distributed on 14th March 2025.

(Mailing report № 10 on 4th December 2024)



M.Kh. Teshayev.

Chairman of the Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc)

Z.I. Boltaev

Scientific Secretary of the Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc), Professor

M.Z. Sharipov

Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc), Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The relevance and relevance of the topic of the dissertation. In the world, the application of the properties of the soil environment is one of the leading places in conducting scientific research in more than a hundred scientific research institutions on the study of the problem of wave propagation in waveguides consisting of elastic and viscous rocky media. Due to the worldwide exposure of surface and underground structures to various quasi-static and dynamic seismic waves, in order to ensure their strength and to study the dynamic stresses and deformations formed in elastic and visco-elastic elements that are a component of building constructions specifies the implementation of the dynamics and methods of wave propagation in them. In this regard, the globalization and the intensification of the information exchange process, the use of effective tools in the construction of above-ground and underground structures is considered important.

The object of the study was taken as a body (or waveguide) consisting of a visco-elastic half-plane, a layer and a two-layer Cossera medium.

The scientific novelty of the research is as follows:

the wave propagation and attenuation properties in waveguides consisting of a viscoelastic Cossera medium were mathematically modeled based on the Navé and Lamé equations of elasticity theory, and a solution methodology and algorithm were developed using the methods of wave dynamics theory;

it was found that the propagation velocities and attenuation of Rayleigh and Stoneley waves at the contact of two media on a half-plane surface consisting of a viscoelastic Cossera medium have a frequency dependence different from that of a classical medium, that is, they increase for higher frequencies, and a comparative assessment was given;

it was found based on the analysis of numerical results that the variation of complex phase velocity modes with wave number in long waveguides consisting of a dissipative inhomogeneous two-layer viscous-elastic Cossera medium can be expressed by non-monotonic functions, and accordingly, a parametric estimate of wave attenuation was given;

as a result of taking into account the momentum of particles in the Cossera medium, a new dispersion relation was obtained, and based on its numerical analysis, the existence of a new wave was found, and a comparative assessment of the wave attenuation for the classical medium and the Cossera medium was given.

Implementation of research results. Based on the scientific results of the research on the features of harmonic wave propagation in waveguides consisting of Cossera medium, the leadership of:

from the methodology and algorithm for calculating moments of tension in the Shell to the methods and algorithm of calculation at Urgench State University in 2017-2020 OT-F4-04(05) "application of the spectral method of solving material non-linear evolution equations. In the fundamental project "biomechanics of the cardiovascular system" (Urgench State University of September 26, 2024 04-04/01-11/4072-number reference) used.

in the fundamental scientific-technical project on the topic "development and

development of methods for studying the state of non-linear dynamic tension-deformation under the influence of temperature and dynamic loads of multi-layer composite pipe curvilinear fragments of cold liquid flowing OT-F4-01, performed in 2016-2020 at the Tashkent Institute of Chemical Technology (Tashkent Institute of chemistry-technology №14 September 2024 1/04-reference 2380) was used. As a result, the multilayer Composite environment allowed for pre-detection and evaluation of resonance areas in wave propagation.

Publication of research results. In total, 15 scientific works were published on the topic of the dissertation, including 7 articles were published in scientific publications recommended for publication of the main scientific results of Doctor of Philosophy (PhD) dissertations of the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, including 4 in republican and 3 in foreign journals.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. The total volume of the dissertation is 120 pages.

E'LON QILINGAN ILMIY ISHLAR RO'YHATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; part I)

1. J.M.Saipnazarov, N.Q.Esanov, Sh.F.Xalilov, G.X.Rahmonova. Elastik muhitda joylashgan suyuqlikli silindrik qobiqning xos tebranishlari. «Ilm sarchashmalari» jurnali. – Urganch. – 2024. –№5/1. 13-18 b. (01.00.00, №12)

2. J.M.Saipnazarov, N.Q.Esanov, R.K.Nurillo. On propagation of natural waves in viscoelastic media. International Scientific Journal Theoretical & Applied Science. p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online). Philadelphia, USA sentabr 2024, P.16-21. (IF=6.630)

3. И.И.Сафаров, Н.Қ.Эсанов, Ж.М.Саипназаров, Ш.Ф.Халилов. Колебания плоской вязкоупругой спиральной пружины. Journal of Advances in Engineering Technology Vol.3(15), July – September, 2024 <https://doi.org/10.24412/2181-1431-2024-3-67-73> . E-ISSN: 2181-1431. acc.:No. ISSN-C-22788 reg. August 25, 2020. (ОАК 12,14)

4. Н.Қ.Эсанов, Ж.М.Саипназаров. Действие подвижной нагрузки на ребристую цилиндрическую оболочку с упругим наполнителем. Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies, 4(4), P. 0301–0309. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-4-0301-0309> . (ОАК (35) CrossRef)

5. Ж.М.Саипназаров. Распространение волн в двухслойной упругой среде. Vuxoro davlat universiteti ilmiy axboroti. –2024–№9. 82-91 b. (01.00.00, №3)

6. Ж.М.Саипназаров, Н.Қ.Эсанов, Ш.Ф.Халилов. Динамическая реакция трубопроводов на сейсмические воздействия. «Ilm sarchashmalari» jurnali. – Urganch. – 2024. –№10. 35-39 b. (01.00.00, №12)

7. Эсанов, Н. К., & Саипназаров, Ж. М. (2024). Особенности распространения волн в вязкой среде в трубах. Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies, 4(4), P. 0238–0253. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2024-4-4-0238-0253> (ОАК (35) CrossRef)

II bo'lim (II часть; part II)

8. J.M.Saipnazarov, U.Q.Turdiyev. Skalyar va vektor maydon nazariyasi. Algoritmlar va dasturlashning dolzarb muammolari mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. –Qarshi: –2023. 19-20 may, 91-94 b.

9. Ж.М.Саипназаров, Н.К.Эсанов, Ш.Н.Алмуратов, Г.Х.Рахмонова. Колебания трубопроводов с протекающей жидкостью. Raqamli texnologiyalar asosida ta'lim jarayonini takomillashtirish mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. Fan va texnologiyalar universiteti. –Toshkent: –2024. 28 mart, 78-80 b.

10. J.M.Saipnazarov, N.Q.Esanov, G.X.Rahmonova. Suyuqlikli qovushoq - elastik qobiqqa quvur to'liqini tarqalishi xususiyatlari. Zarafshon vohasini

kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari, muammolari va istiqbollari V-xalqaro ilmiy-amaliy anjumani.–Navoi: –2024. 18-19 April, 126-128 b.

11. J.M.Saipnazarov, N.Q.Esanov, G.X.Raxmonova. To‘g‘ri to‘rtburchakli uch qavatli qovushoq –elastik plastinkani erkin tebranishidagi asosiy xos chastotani topish. Zarafshon vohasini kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari, muammolari va istiqbollari V-xalqaro ilmiy-amaliy anjumani.–Navoi: –2024. 18-19 April, 128-130 b.

12. Ж.М.Саипназаров, Н.Қ.Эсанов, Ш.Ф.Халилов. Колебания цилиндрических оболочек в упругой среде. Механика va matematikaning amaliy muammolari. (I.I.Safarovning 70-yillik yubileyiga bag‘ishlanadi).–Toshkent: –2024. 17-18-may, 36-39 b.

13. Ж.М.Саипназаров, О.Умаров, О.Ахмедов. О действии подвижных нагрузок на неподкреплённый цилиндрических тоннель. Механика va matematikaning amaliy muammolari. (I.I.Safarovning 70-yillik yubileyiga bag‘ishlanadi).)–Toshkent: –2024. 17-18-may, 379-382 b.

14. Esanov N.Q., Saipnazarov J.M . Elastik muhitga erkin to‘lqinlarni tarqalishi. Axborot texnologiyalarning rivojlanish jarayonlarida ta‘lim, ilm va innovatsiya: muammolar va yechimlar” mavzusida Xalqaro ilmiy-texnik anjuman. –Qarshi:–2024. 15-16-noyabr, 320-321 b.

15. Esanov N.Q., Saipnazarov J.M. “Momentli muhitda to‘lqin tarqalish masalasi algoritmini tuzishda axborot texnologiyaning o‘rni. Axborot texnologiyalarning rivojlanish jarayonlarida ta‘lim, ilm va innovatsiya: muammolar va yechimlar” mavzusida Xalqaro ilmiy-texnik anjuman. – Qarshi: 2024. 15-16-noyabr, 325-327 b.

**Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tilidagi matnlari
“IPAKYO‘LI” nashriyotida tahrirdan o‘tqizildi.**

**Bosishga ruxsat etildi: 13.03.2025.
Qog‘oz bichimi 60x84 1/16.
Temes New Roman garniturasida chop etildi.
Hajmi 3 bosma taboq. Adadi 100 nusxa. Buyurtma № 333.**

**“West Media Express” MCHJ bosmaxonasida chop etildi.
Bosmaxona manzili: Buxoro shahri,
Qayum Murtazoyev ko‘chasi 15A uy.
Tel: +998 93 080 39 00**

