

**BUXORO DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMYIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 RAQAMLI ILMYIY KENGASH**

BUXORO DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

RO‘ZIYEVA MAVLUDA ANVAROVNA

**KO‘P QATLAMLI DISSIPATIV BIR JINSLI BO‘LMAGAN SILINDRIK
QOBIQDA XOS VA MAJBURIY TO‘LQINLARNING TARQALISHI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**Fizika -matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (Doctor of Philosophy) dissertasiyasi
AVTOREFERATI**

Buxoro – 2025

**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 and mathematical sciences**

Ro'ziyeva Mavluda Anvarovna

Ко'п qatlamli dissipativ bir jinsli bo'lmagan silindrik qobiqda xos va majburiy to'liqlarning tarqalishi.....3

Рузиева Мавлуда Анваровна

Распространение собственных и вынужденных волн в многослойной диссипативной неоднородной цилиндрической оболочке21

Ruzieva Mavluda Anvarovna

Propagation of specific and forced waves in a multilayer dissipative inhomogeneous cylindrical shell41

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ

List of published works.....46

**BUXORO DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

BUXORO DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

RO‘ZIYEVA MAVLUDA ANVAROVNA

**KO‘P QATLAMLI DISSIPATIV BIR JINSLI BO‘LMAGAN SILINDRIK
QOBIQDA XOS VA MAJBURIY TO‘LQINLARNING TARQALISHI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**Fizika -matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (Doctor of Philosophy) dissertasiyasi
AVTOREFERATI**

Buxoro – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.2.PhD/FM1310 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Buxoro davlat texnika universitetiga bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume) universitet veb-saytida (www.https://bstu.uz/) va "Ziyonet" Axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Safarov Ismoil Ibrohimovich
fizika-matematika fanlari doktori

Rasmiy opponentlar:

Mavlanov To'liq Mavlonovich
texnika fanlari doktori, professor

Indiaminov Ravshan Shukurovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Namangan davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Buxoro davlat texnika universiteti huzuridagi PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 raqamli ilmiy kengashning 2025 yil 28 oktabr soat 11:30 dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 200100, Buxoro shahar, Q.Murtazoyev ko'chasi, 15. Tel.: (+99865) 223-78-84; faks: (+99865) 223-79-72, E-mail: bstu_info@edu.uz).

Dissertatsiya bilan Buxoro davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№474 raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: (200100, Buxoro shahri, Q.Murtazoyev ko'chasi, 15. Tel.: (+99895) 604-44-70).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil 14 oktabr kuni tarqatildi.

(2025 yil 29 avgustdagi №8 raqamli reyestr bayonnomasi).



M.X. Teshayev

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

R.A. Sabirova

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi, fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa fanlari doktori(PhD).

Z.I. Boltayev

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda qovushqoq- elastik ko'p qatlamli konstruksiyalar elementlarining tebranishlari va tashqi yuklanish ta'sirida ro'y beradigan dinamik jarayonlarni o'rganib, qurilish va texnikaning har xil jabhalarida qo'llaniladigan muhandislik qurilmalarining ko'p qatlamli elementlari dinamikasini tadqiq etish, zamonaviy hisoblash metodikalari va algoritmlarini qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida ko'p qatlamli bir jinsli bo'lmagan silindrik qobiqlar suv osti kemalarida, uchuvchi apparatlarning ba'zi qurilmalarida, mexanik sistemalarning mustahkamligini oshirish uchun zamonaviy mashina elementlari va qurilmalari har xil dinamik (vibratsiyali va zarbali) kuchlar ostida ishlaydigan, energiya dissipativlik xususyatlarini hisobga oladigan kompozitsion materiallardan foydalanish va ularning dinamik xarakteristikalarini hisoblashning yangi usullarini amaliyotga joriy etishni taqozo etadi.

Jahonda ko'p qatlamli konstruksiyalarni dinamik holatdagi kuchlanishlar konsentratsiyasining minimal taqsimlanishini ta'minlovchi ishonchli hisoblash metodikalari va algoritmini yaratishga yo'naltirilgan ilmiy tatqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada dinamik yuklanishlar ta'siri ostidagi qovushqoqlik xususiyatlari turlicha bo'lgan ko'p qatlamli konstruksiyalardagi dinamik jarayonlarni samarali hisoblash metodikasi va algoritmini ishlab chiqishga, turli tipdagi yer usti va yer osti muhandislik qurilmalari elementlarining kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatlarini aniqlashga yo'naltirilgan maqsadli ilmiy izlanishlarga alohida etibor qaratilmoqda.

Respublikamizda bu borada, qovushqoqlik parametrlarini hisobga olib konstruksiyalarning rezonans holatini baholash katta o'rin egallab, ushbu holat faqat dinamik jarayonida energiya dissipatsiyasi mohiyatini ko'p qatlamli muhit uchun tushunish orqali uni aniqlash usullarini ishlab chiqishga imkon beribgina qolmay, shu bilan birga dissipativ xarakteristikalarni aniqlash va optimallashtirish, shuningdek, strukturaviy bir jinsli bo'lmagan uzun qatlamli mexanik sistemalarning dinamik kuchlanish-deformatsiya holatini o'rganish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 30-maydagi PF-144-sonli "O'zbekiston Respublikasi seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"¹ gi Farmoni bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan dinamik holatdagi materiallar zo'riqishini hisoblashda matematik modellashtirish va foydalaniladigan materiallarning reologik xususiyatlarini hisobga olgan holda dasturiy ta'minot tizimlarini ishlab chiqishni keng joriy etish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 7-fevraldagi PF-4947-son "O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida"gi, 2019-yil 23-oktyabrdagi PF-5853-son "Favqulodda vaziyatlarning oldini olish va ularni bartaraf etish tizimi samaradorligini tubdan oshirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Farmoni, 2017-yil 9-avgustdagi PQ-3190-son

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022- yil 30-maydagi PF-144-son "O'zbekiston Respublikasining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi qarori

“O‘zbekiston Respublikasi hududi va aholisining seysmik chidamli qurilish va seysmologiya sohasida ilmiy tadqiqotlar o‘tkazishni yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”² gi, 2020-yil 7-maydagi PQ-4708 “Matematika sohasidagi ta‘lim va tadqiqotlar sifatini takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”³ gi, qarorlari hamda mazkur faoliyatlarga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya ishi ma‘lum 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‘rganganlik darajasi. Quyidagi chet el olimlari qovushqoq elastik uch qatlamli silindrik jismlarda to‘lqin tarqalishini ilmiy tahlil qilishgan: A.A.Ilyushin, L.V.Brexovskix, A.S.Volmir, I.A.Viktorov, A.G.Gorshkov, M.D.Genkin, Y.I.Shemyakin, I.Ye.Troyanovskiy, I.A.Kiyko, A.N.Guz, V.T.Grinchenko, G.L.Komissarova, U.K.Nigul, V.G.Gogoladze, L.A.Molotkov, Yu.I.Novichkov, G.I.Petrashen, P.V.Krauklis, K.V.Frolov, A.N.Antonov, V.P.Matveenko, I.N.Shardakov, E.I.Starovoytov, N.S.Anofrikova, T.Miker, A.Meysler, R.M.Deyvis, R.Mitra, G.Kolskiy, J.D.Axenbax, B.V.Shafer, R.I.San va respublikamiz olimlaridan: X.A.Raxmatulin, M.T.Urazbayev, T.Sh.Shirinkulov, V.K.Kabulov, T.R.Rashidov, Y.N.Mubarakov, B.M.Mardonov, G.X.Xojmetov, A.A.Ishanxodjeyev, T.M.Mavlonov, M.M.Mirsaidov, K.S.Sultanov, Sh.M.Mamatkulov, F.B.Badalov, A.Abdusatorov, I.I.Safarov, X.Xudaynazarov, M.X.Teshayev, Sh.S.Yuldashev va boshqalar materialning reologik xususiyatlarini hisobga olgan holda turli xil ta’sirlarda (yoki tashqi yuk bo‘lmagan taqdirda) plastinka va qobiqli mexanik sistemalarining tebranishlarini ilmiy tahlil qildilar.

Hozirgi vaqtda qovushqoq-elastik mexanik sistemalarning dinamikasi bilan bog‘liq bir qator muammolar mavjudki (dissipativ jihatdan bir jinsli va bir jinsli bo‘lmagan), ularni hal qilish to‘lqin tarqalish muammolarining yangi qirralarini kashf etishga imkon beradi. Ishonchli usullar va algoritmlarni yaratish mashinasozlikda dinamik mustahkamlik va barqarorlikning ko‘plab muammolarini hal qilishga imkon beradi.

Shu bilan birga, hozirga qadar qovushqoq-elastik mexanik sistemalarda energiya dissipatsiyasi masalalarining nazariy asoslari, yechish usullari to‘laligicha ishlab chiqilmagan, nazariy masala matematik jihatdan qo‘yilmagan, sonli natijalar olish uchun yechish usullari va algoritmlar to‘la ishlab chiqilmagan. Qovushqoq-elastik mexanik sistemalar uchun yadroni va uning reologik parametrlarini tanlash, ularning chastota va dempferlash koeffitsiyentiga ta’sirini o‘rganishni talab qiladi va shuning uchun bu tizimli muammo qo‘shimcha ilmiy izlanishlar olib borishni talab etadi.

²O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-maydagi PQ-158-sonli “O‘zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta‘minlash tizimini yanada takomillashtirishga oid qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi qarori

³O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining PQ-4794-sonli qarori, «O‘zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta‘minlash tizimini tubdan takomillashtirish chora tadbirlari to‘g‘risida» 30.07.2020 y.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya Buxoro davlat texnika universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq 2021-2026 yillarga mo'ljallangan OT-F4-01 raqamli "Matematika va mexanikaning dolzarb muammolari" loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi - dissipativ bir jinsli bo'lmagan ko'p qatlamli silindrik jismlarga xos to'lqin va majburiy to'lqinlarning tarqalishini o'rganish metodikasi va algoritmini yaratish hamda mavjud nazariya ilmiy asoslarini takomillashtirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

materiallarning qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga olgan holda ko'p qatlamli chekli uzunlikdagi silindrik jismlar (qobiqlar)ning xos va majburiy to'lqinlarini tarqalish masalalarining matematik qo'yilishi, yechish usullari va algoritmini ishlab chiqish;

strukturaviy dissipativ bir jinsli bo'lmagan mexanik sistemalar uchun, dispersion munosabatni chastotalarning bir nechta modalariga bog'liq qurish;

vibratsion yuklanishda rezonans holatni baholash uchun amplituda chastota orasidagi bog'lanishlarga mexanik va geometrik parametrlar ta'sirini baholash;

strukturaviy dissipativ bir jinsli bo'lmagan mexanik sistemalarning tashqi garmonik yuklanishidagi kuchlanishlar-deformatsiya holatini fiziko-mexanikaviy va geometrik parametrlarga bog'liqligini qiyosiy baholash.

Tadqiqotning obyekti sifatida ikki, uch va to'rt qatlamli uzun qovushqoq-elastik silindrik jism olingan.

Tadqiqotning predmetini qovushqoq-elastiklik xususiyatlarini hisobga olgan holda bir jinsli bo'lmagan mexanik sistemalarning dinamik nazariyasini rivojlantirish, hisoblash metodikasini hamda spektral masalalarni o'rganish uchun kompleks arifmetikaga asoslangan algoritmi ishlab chiqishni tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida dissertatsiya ishida olingan xususiy hosilali integro-differensial tenglamalar sistemasini yechish uchun "замораживание" usuli, o'zgaruvchilarni ajratish usuli, Myuller, Gauss, Laplas va Godunovning ortogonal progonka usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk marta matereallarning qovushqoq-elastiklik xususiyatlarini Koltunov-Rjanitsin yadrosi orqali hisobga olgan holda ko'p qatlamli dissipativ bir jinsli bo'lmagan silindrik qobiqda xos va majburiy to'lqinlarninig tarqalishi masalalarini yechish metodikasi va algoritmi Laplasning integral almashtirishlari, muzlatish, Gauss va Myuller usullariga asoslanib ishlab chiqilgan;

ko'p (ikki, uch va to'rt) qatlamli dissipativ bir jinsli va bir jinsli bo'lmagan silindrik jismlarning birinchi, ikkinchi, uchinchi va to'rtinchi xos tebranishlar kompleks chastotalarning haqiqiy qismlarining 5 % gacha farq qilishi, mavhum qismlarining esa radikal o'zgarishi topilgan;

dissipativ bir jinsli bo'lmagan to'rt qatlamli silindrik qobiq faza tezligining birinchi modasi to'lqin soni $0 \leq \eta \leq 0.1$ oralig'ida botiqligi, faza tezligining birinchi va uchinchi modalari to'lqin soniga amalda bog'liq bo'lmasligi, yuqori modalar $0.1 \leq \eta \leq 0.6$ oralig'ida to'lqin soniga bog'liq bo'lishi, $\eta > 0.6$ bo'lganda esa bog'liq bo'lmasligi dispersion munosabtlarni ifodalovchi transendent tenglama yechimlaridan topilgan;

ikki qatlamli qobiqning ko'chish amplitudasining ichki erkin sathidagi qiymati materealning qovushqoqlik xususiyatlariga bog'liqligini 10-15 % ni tashkil etishi, Kirxgof-Lyav va Timoshenko gipotezalari asosida olingan natijalar past chastotalarda 20 % gacha, yuqori chastotalarda esa farq 10 % bo'lishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

dissipativ bir jinsli bo'lmagan mexanik sistemalar uchun olingan natijalar turli parametrlarga bog'liq bo'lgan so'nish dekrementi koeffitsiyenti nomonoton bog'liqligi samarasidan yangi texnologiyalarning turli sohalarida ko'plab amaliy muammolarni hal qilish usullari taklif etilgan;

ishlab chiqilgan metodika va algoritmlar radioelektron uskunalari (REU) tebranishlarini kamaytirishga, shuningdek, mexanik sistemalarning rezonans sohalaridagi kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatlarini optimallashtirishga imkon beradi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi masalaning korrekt qo'yilishi, matematik munosabatlarning qat'iyligi, ma'lum va keng qo'llaniladigan yechish usullaridan foydalanish va masalalarning boshqa olimlar tomonidan olingan yechimlari bilan taqqoslashlar orqali izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati ko'p qatlamli qovushqoq-elastik silindrik jismlarga xos va majburiy to'lqinlar tarqalishi nazariyasining rivojlanishiga hissa qo'shishidan iborat.

Dissipativ bir jinsli bo'lmagan mexanik sistemalarda dekrement so'nish koeffitsiyentining geometrik va fizik-mexanik parametrlarga bog'liq o'zgarishi munosabatidan o'rganilayotgan sohada energiyani boshqarish imkonini beradi. Bu esa titrashlarni kamaytirishda ham ishlab chiqilgan algoritmlar va dasturlardan foydalanishga imkon berishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Uch qatlamli dissipativ bir jinsli bo'lmagan silindrik jismning chiziqli erkin va majburiy tebranishining ilmiy asoslarini hisobga olgan holda hisoblash usuli, algoritmi va dasturi bo'yicha olingan natijalar asosida:

dissipativ bir jinsli sistemalarda tebranish amplitudasini so'ndirish samarasidan Toshkent kimyo-texnologiya institutida OT-F4-01 "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 loyihasini amalga oshirishda qo'llanilgan (Toshkent kimyo-texnologiya instituti 2025-yil 21-maydagi 1/01-1820 raqamli ma'lumotnomasi). Natijada, quvurning rezonans sohasidagi tebranishlarni boshqarish imkoniyati yaratilgan;

dissertatsiyada ishlab chiqilgan uzun qovushqoq-elastik to'ldiruvchili yupqa silindrik qobiqda to'lqin tarqalishi masalasini yechish metodikasidan Rossiya Fundamental tadqiqotlar jamg'armasining davlat ilmiy-texnika dasturi doirasida 2018–2020-yillarda bajarilgan РФФИ-18-48-240007 raqamli "Issiqlik elektrstansiyalari ishlab chiqarish-ekologik monitoringining axborot ishonchliligini oshirishning multiversion usuli" ("Мультиверсионный метод повышения информационной надежности производственно-экологического мониторинга тепловых электростанций") nomli fundamental loyihada foydalanilgan (Rossiya ilmiy va muhandislik jamoat birlashmalari ittifoqining Krasnoyarsk o'lkasi fan va

texnika uyining 2025-yil 10-iyuldagi 177-40-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, ishlab chiqarish-ekologik monitoringning nazariy asoslarini yaratish va umumlashtirilgan sifat mezonini baholash uchun jarayonlarni matematik modellashtirish imkoniyati yaratilgan.

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 4 ta maqola, jumladan, 2 tasi respublika va 2 tasi xorijiy jurnallarda nashr qilingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, uchta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 104 betni tashkil qiladi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida o'tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, obyekt va predmeti tavsiflangan, respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchlilik asoslangan hamda ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Ko'p qatlamli qovushqoq-elastik silindrik qobiqda xos va majburiy garmonik to'lqinlarning tarqalishini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili”** deb nomlangan birinchi bobida qovushqoq-elastik ko'p qatlamli silindrik qobiqqa xos to'lqinlar tarqalishi va tashqi yuklanishi natijasida hosil bo'ladigan dinamik jarayonlar holatini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlarning qisqacha tahlili keltirilgan. Adabiyotlarni tahlil qilish natijasida quyidagi xulosalar chiqarilgan:

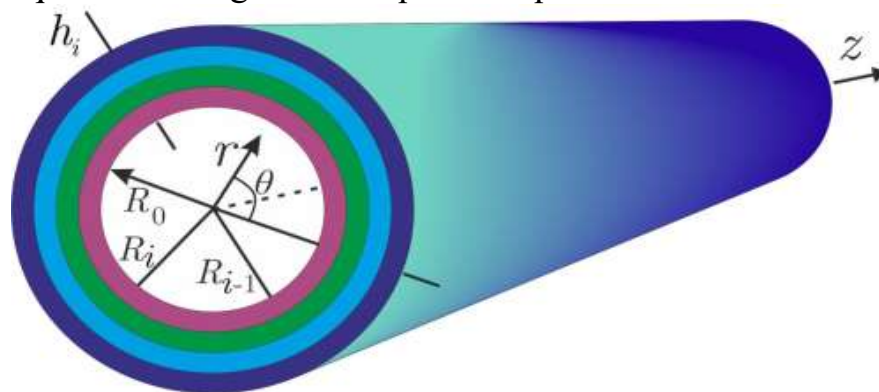
to'lqin dinamikasining qo'llanilayotgan usullari va masalalari, asosan, dissipativ bir jinsli, ya'ni qovushqoq elastik silindrik qobiq uchun o'rganilgan;

tahlil natijalar shuni ko'rsatadiki, garmonik to'lqinlar inshootlarga ta'sir qilganda murakkab to'lqin maydoni hosil qiladi, uni faqat to'lqin dinamikasini usullari bilan o'rganish maqsadga muvovifiq ekanligi ko'rsatilgan;

Bir qator hollarda, muhit bilan bog'lanishda inshootlariga garmonik to'lqin ta'sirlarida hosil bo'ladigan rezonans holatlarni hisoblashda muhitning qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga olmaslik katta xatoliklarga olib kelishi mumkinligi ko'rsatib berilgan.

Dissertatsiyaning **“Ko'p qatlamli qovushqoq-elastik silindrik qobiqda xos to'lqinlarning tarqalishi va majburiy kuchlar ta'siridagi kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini topish masalalarining qo'yilishi, yechish metodikasi va algoritmi”** deb nomlangan ikkinchi bobida xos va garmonik to'lqinlarning ko'p qatlamli silindrik shakldagi qobiqlarga yuklanishi masalasining matematik qo'yilishi, yechish metodikasi va algoritmi keltirilgan. Bu bob ikki paragrafdan iborat bo'lib, birinchi paragrafida qovushqoq-elastik ko'p qatlamli silindrik qobiqqa to'lqin tarqalishi, ta'siri masalalarini qo'yilishi va yechish

metodikasi keltirilgan. Ikkinchi paragrafida esa ko‘p qatlamli qovushqoq-elastik silindrik qobiqqa garmonik to‘lqinlarning tarqalishi va tashqi yuklanishi ta‘sirida hosil bo‘ladigan dinamik jarayonni o‘rganish metodikasi va algoritmi keltirilgan. Faraz qilaylik silindrik koordinatalar sistemasida 1-rasmga keltirilganidek, ko‘p qatlamli silindrik qobiqlar sistemasi berilgan bo‘lsin. Shu ichma-ich joylashgan silindrik qobiqlar sistemasiga xos to‘lqinlar tarqalishi masalasini ko‘rib chiqamiz.



1-rasm. Ko‘p qatlamli silindrning hisob sxemasi

Silindr cheksiz ($-\infty < z < \infty$) va yarim ($0 < z < \infty$) cheksiz hollarini ko‘ramiz. Silindrning tashqi va ichki qavati yupqa silindrik qobiqdan iborat bo‘lishi mumkin. Silindr qatlamlarining to‘lqin tarqalishini ifodalovchi harakat differensial tenglamasi quyidagicha bo‘ladi:

$$(\tilde{\lambda}_j + 2\tilde{\mu}_j) \text{graddiv} \vec{u}_j - \tilde{\mu} \text{rotrot} \vec{u}_j = \rho_j \frac{\partial^2 \vec{u}_j}{\partial t^2}, (j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

bunda $\tilde{\lambda}_j$ va $\tilde{\mu}_j$ operator ko‘rinishdagi elastiklik modullari

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_j f(t) &= \lambda_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\lambda}^{(i)}(t - \tau) f(\tau) d\tau \right], \tilde{\mu}_j f(t) \\ &= \mu_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\mu}^{(i)}(t - \tau) f(\tau) d\tau \right]; \end{aligned}$$

$f(t)$ – ixtiyoriy uzluksiz funksiya; $R_{\mu}^{(i)}(t - \tau)$ va $R_{\lambda}^{(i)}(t - \tau)$ –relaksatsiya yadrolari; λ_{0j}, μ_{0j} –qatlamlarning oniy elastiklik moduli. Qattiq kontaktlari uch xil kontakt sharti bajariladigan holatlar, ya’ni qattiq mahkamlanganlik, sirpanuvchi kontakt va yupqa massasiz qatlam bo‘lgan holatlardagi mexanik sistemaning dinamik xususiyatlari o‘rganilgan.

Agar ko‘p qatlamli silindrik qobiqning ichki va tashqi qobig‘i yupqa silindrdan iborat bo‘lsa, u holda gipotezalar (Krixgof-Lyav yoki Timoshenko) ga asoslangan yupqa qobiq tenglamasidan foydalanish mumkin, operator koeffitsiyentli qobiq tebranishlar tenglamasi quyidagicha bo‘ladi.

$$L\tilde{E}\vec{u} = \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0 h_0} \vec{p} + \rho_0 \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0} \left(\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \right), (k = 1, 3, \dots, N) \quad (2)$$

Bunda: $\tilde{E}f(t) = E_{01} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_E(t - \tau) f(\tau) d\tau \right]$, $R_E^{(i)}(t - \tau)$ –relaksatsiya yadrosi;

E_0 –qobiqning oniy elastiklik moduli, h_0 – qobiq qalinligi, ν_0 – Puasson koeffitsiyenti,

$$L = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1-\nu_0}{2R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} & \frac{1+\nu_0}{2R} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \theta} & \frac{\nu_0}{R} \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1+\nu_0}{2R} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \theta} & \frac{1+\nu_0}{2} (1+4a) \frac{\partial^2}{\partial^2} + (1+a) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} & \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} - a(2-\nu) \frac{\partial^3}{\partial z^2 \partial \theta} - \frac{a}{R^2} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \\ \frac{\nu}{R} \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} - a(2-\nu) \frac{\partial^3}{\partial z^2 \partial \theta} - \frac{a}{R^2} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} & \frac{1}{R^2} + a \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right)^2 \end{pmatrix},$$

$\vec{u} = \vec{u}(u_r, u_\theta, u_z)$ – qobiq o‘rta sirtining ko‘chish vektori (Kirxgof–Lyav gipotezalari o‘rinli bo‘lganda), ko‘pincha quyidagicha belgilash kiritiladi ($u_r = u$; $u_\theta = v$; $u_z = w$).

Agar silindrik jism qatlamlardan tashkil topgan bo‘lsa, u holda uning harakati tenglamalari (1) ko‘rinishda bo‘ladi. Qatlamlar orasida qattiq mahkamlanganlik sharti qo‘yiladi.

$$r = a_j: \quad \sigma_{rrj} = \sigma_{rr(j+1)}; \quad \sigma_{r\theta j} = \sigma_{r\theta(j+1)}; \quad \sigma_{rzj} = \sigma_{rz(j+1)};$$

$$u_j = u_{j+1}; \quad \vartheta_j = \vartheta_{j+1}; \quad w_j = w_{j+1}. \quad (3)$$

Qatlamlar orasida sirpanuvchanlik sharti (qatlamlar orasida qarshilik bo‘lmasa) qo‘yiladi

$$r = a_j: \quad \sigma_{rrj} = \sigma_{rr(j+1)}; \quad \sigma_{r\theta j} = \sigma_{rzj} = 0;$$

$$\sigma_{r\theta(j+1)} = \sigma_{rz(j+1)} = 0; \quad w_j = w_{j+1}. \quad (4)$$

Qatlamlar orasida massasiz element qo‘yilgan bo‘lsa, u holda chegaraviy (kontakt) sharti tekis deformatsiya holati masalasi uchun quyidagicha bo‘ladi

$$r = a_j: \quad \sigma_{rrj} = \sigma_{rr(j+1)}; \quad \sigma_{r\theta j} = \sigma_{r\theta(j+1)};$$

$$\begin{aligned} \sigma_{rrj} &= \bar{k}_r (u_{rj} - u_{r(j+1)}); \\ \sigma_{r\theta j} &= \bar{k}_\theta (u_{\theta j} - u_{\theta(j+1)}). \end{aligned} \quad (5)$$

Agar $r = a_1$ birinchi qatlam ichki sirti kuchlanishlardan ozod qilingan bo‘lsa, u holda quyidagicha shart qo‘yiladi:

$$r = a_N: \quad \sigma_{rrN} = 0; \quad \sigma_{r\theta N} = 0; \quad \sigma_{rzN} = 0. \quad (6)$$

Qobiqning erkin chekasi, ya’ni $z=0$ da

$$\sigma_{zzj} = \sigma_{rzj} = \sigma_{\theta zj} = 0. \quad (7)$$

Ba’zi holatda majburiy rezonans to‘lqini hosil qilish kerak bo‘lsa, $z=0$ da quyidagicha shart qo‘yiladi:

$$\sigma_{zz} = T_g(r) \cos p \theta e^{-i\omega t}, \quad \sigma_{rz} = \sigma_{\theta z} = 0. \quad (8)$$

Bunda $T_g(r)$ – masalada berilgan funksiya bo‘lib, masalaning qo‘yilishiga qarab tanlab olinadi. Agar $z \rightarrow \infty$ bo‘lsa, energiya manbai yo‘q degan shart yoki to‘lqin yutilishi sharti qo‘yiladi.

Faraz qilaylik, ko‘p qatlamli silindrik qobiq massasiz deformatsiyalanuvchi elementlar (inersiyasiz element)ga o‘rnatilgan bo‘lsin. Buni Vinkler asosi ham deyiladi. Silindrik quvur uchun silindrik koordinatalar sistemasida quyidagicha bo‘ladi:

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k; \quad q_{1\theta}^k = 0, \quad (9)$$

$$\tilde{k}_r^k [f(t)] = k_{r0}^k \left[f(t) - \int_0^t R_k(t - \tau) f(\tau) d\tau \right],$$

k_{r0}^k –oniy posteli koeffitsiyenti, $R_k(t - \tau)$ –relaksatsiya yadrosi. Agar Vinkler asosi olinganda (9) dan foydalanilganda asosning inersiya kuchini ham hisobga olganda quyidagicha aniqlanadi:

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k - m_f \ddot{w}^k, \quad (10)$$

bunda m_f –asosning samarali massasi. Agar muhitning quvurga beradigan ta'siri Pasternak modeli bo'yicha hisobga olinsa, u holda

$$q_r^k = -\tilde{k}_{r1}^k w^k - t_f \Delta w^k, \quad (11)$$

Bunda t_f – siljish koeffitsiyenti, \tilde{k}_{r1}^k –siqilishning operator koeffitsiyenti. Chegaraviy va kontakt shartlaridan tashqari boshlang'ich shartlar ham qo'yiladi

$$\vec{u}_j |_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial \vec{u}_j}{\partial t} |_{t=0} = 0. \quad (12)$$

Bu yerda $\sigma_{rrj}, \sigma_{r\theta j}, \sigma_{\theta\theta j}, \sigma_{rzj}$ – kuchlanishlar tenzorining komponentlari, $u_{rj}, u_{\theta j}, u_{zj}$ –ko'chish vektorining komponentlari, ρ_j –materiallar zichligi.

Ko'p qatlamli silindrik qobiq tenglamalari (1) ni Grin Lemb almashtirish yordamida yechamiz. U holda oxirgi olingan tenglamadagi ko'chish vektori potentsialli va solenoidli ko'rinishda tasvirlanadi. Qatlamlarning ko'chishi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\vec{u}_j = \text{grad} \phi_j + \text{rot} \vec{\psi}_j, \quad \text{div} \vec{\psi}_j = 0, \quad (13)$$

Agar fazoviy ko'p qatlamli silindrik qobiq olinsa, u holda ko'chish potentsiallari tenglamasi quyidagicha bo'ladi:

$$\nabla^2 \phi_j - \frac{1}{c_{pj}^2 \Gamma_{kj}} \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial t^2} = 0; \quad \nabla^2 \psi_{zj} - \frac{1}{c_{sj}^2 \Gamma_{kj}} \frac{\partial^2 \psi_{zj}}{\partial t^2} = 0;$$

$$\nabla^2 \psi_\theta - \frac{\psi_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_r}{\partial \theta} - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_k} \frac{\partial^2 \psi_\theta}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \psi_r - \frac{\psi_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_\theta}{\partial \theta} - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_k} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial t^2} = 0 \quad (14)$$

Bu yerda

$$c_p^2 = \frac{\lambda_{01} + 2\mu_{01}}{\rho}; \quad c_s^2 = \frac{\mu_{01}}{\rho},$$

$$\Gamma_{kj} = 1 - \Gamma_j^c(\omega) - i\Gamma_j^s(\omega),$$

$$\Gamma_{\lambda j}^c = \Gamma_{\mu j}^c = \Gamma_j^c, \quad \Gamma_{\lambda j}^s = \Gamma_{\mu j}^s = \Gamma_j^s,$$

$$R_{\lambda j} = R_{\mu j} = R_j.$$

Yuqoridagi (14) tenglamaning yechimi quyidagicha izlanadi:

$$\left. \begin{aligned} \phi_j(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_{jn}(\alpha_j r) \begin{Bmatrix} \cos n \theta \\ -\sin n \theta \end{Bmatrix} e^{\pm i \gamma_p z} e^{-i \omega t}; \\ \psi_{rj}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{rjn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \sin n \theta \\ -\cos n \theta \end{Bmatrix} e^{\pm i \gamma_p z} e^{-i \omega t}; \\ \psi_{\theta j}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{\theta jn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \cos n \theta \\ -\sin n \theta \end{Bmatrix} e^{\pm i \gamma_p z} e^{-i \omega t}; \\ \psi_{zj}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{zjn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \sin n \theta \\ \cos n \theta \end{Bmatrix} e^{\pm i \gamma_p z} e^{-i \omega t}; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Bunda n -butun son; γ_p - to'liqin tarqalishning o'zgarmas kattaligi; ω -kompleks chastota; $r = \frac{r_1}{a_0}$, $z = \frac{z_1}{a_0}$. Agar (15) ni (14) ga qo'ysak, quyidagicha oddiy differensial tenglamalarni olamiz:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \varphi_{jn}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi_{jn}}{dr} + \left(\alpha_j^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \varphi_{jn} &= 0; \\ \frac{d^2 \psi_{zjn}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{zjn}}{dr} + \left(\beta_j^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \psi_{zjn} &= 0; \\ \frac{d^2 \psi_{\theta jn}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{\theta jn}}{dr} + \frac{1}{r^2} (-n^2 \psi_{\theta jn} + 2n \psi_{\theta jn} - \psi_{\theta jn}) + \beta_j^2 \psi_{\theta jn} &= 0; \\ \frac{d^2 \psi_{rjn}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{rjn}}{dr} + \frac{1}{r^2} (-n^2 \psi_{rjn} + 2n \psi_{\theta jn} - \psi_{rjn}) + \beta_j^2 \psi_{rjn} &= 0; \end{aligned} \quad (16)$$

Quyidagicha belgilashlar kiritilgan:

$$\alpha_j^2 = \frac{\bar{\Omega}_j^2}{\gamma_j^2} - \gamma_p^2; \quad \beta_j^2 = \bar{\Omega}_j^2 - \gamma_p^2; \quad \bar{\Omega}_j = \frac{\omega a_j}{\bar{c}_{sj}}; \quad \gamma_j^2 = \frac{2(1 - \nu_j)}{1 - 2\nu_j}.$$

Tenglamalarning yechimlari 1 va 2 jinsli n -tartibli Bessel va Xankel funksiyalari orqali ifodalanadi:

$$\begin{aligned} \phi_j &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[A_{nj} H_n^{(1)}(\alpha_j r) + A'_{nj} H_n^{(2)}(\alpha_j r) \right] \cos n \theta e^{-i \omega t}, \\ \vec{\psi}_N &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[\vec{M}_{nN} H_n^{(1)}(\beta_N r) + \vec{L}_{nN} H_n^{(2)}(\beta_N r) \right] \sin n \theta e^{-i \omega t}, \\ \vec{\psi}_j &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[\vec{B}_{nj} H_n^{(1)}(\beta_j r) + \vec{B}'_{nj} H_n^{(2)}(\beta_j r) \right] \sin n \theta e^{-i \omega t}, \\ \phi_N &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[C_{nN} H_n^{(1)}(\alpha_N r) + D_{nN} H_n^{(2)}(\alpha_N r) \right] \cos n \theta e^{-i \omega t}, \end{aligned} \quad (17)$$

bunda $A_{nj}, A'_{nj}, \vec{B}_{nj}, \vec{B}'_{nj}$ - ixtiyoriy o'zgarmas kattaliklar bo'lib, chegaraviy shartlardan topiladi; $H_n^{(1)}(\alpha_j r)$ va $H_n^{(2)}(\alpha_j r)$ - mos ravishda Xankel funksiyalari

$$H_n^{(1),(2)}(\alpha r) = J_n(\alpha r) \pm i N_n(\alpha r).$$

Ixtiyoriy o'zgarmaslarni topish uchun chegaraviy shartlar (3.3)-(3.6) dan foydalansak, bir jinsli bo'lmagan kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalar sistemasini olamiz:

$$[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)]\{q\} = \{P_2\}, \quad (18)$$

bunda $\{q\}$ – vektor stolbes bo'lib ixtiyoriy o'zgaruvchilardan tashkil topgan; $\{R_1\}, \{R_2\}$ – tashqi tushadigan to'liq ta'siridagi vektor stolbes ; $[C_1], [C_2]$ – kvadrat matritsa, elementlari Bessel va Xankel funksiyalaridan tashkil topgan. Bu (18) kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalar sistemasi Gaussning o'zgaruvchilarni ketma-ket yo'qotish usuli yordamida dissertatsiyada ishlab chiqilgan algoritm bilan yechilgan. Agar tashqi tushuvchi to'liq hisobga olinmasa, u holda qovushqoq elastik muhitda joylashgan sferik jismning erkin tebranishlar chastotalari topiladi. Bu holda (18) murakkab ko'rinishdagi kompleks transcendent funksiyalardan tashkil topgan algebraik tenglamani beradi. Buni esa faqat sonli usullar yordamida yechish mumkin. (18) tenglamani yechishda har bir integratsiya qadamida Gauss usuli qo'llaniladi. Shuning uchun aniqlovchini ko'p had ko'rinishda ifodalash talab etilmaydi. Kompleks ildizlarni topishda Myuller usulida o'ta aniqlikda tez topiladi va yaqinlashishni ta'minlanadi.

Noturg'un kuchlar ko'p qatlamli silindrik qobiqqa yuklanganda qo'yilgan masalani yechish uchun vaqt bo'yicha Laplasning integral almashtirishi qo'llaniladi ($0 < t < T_1$),

$$f^L(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt = L[f(t)] \quad (19)$$

Teskari almashtirish, ya'ni orginalni topish uchun ($f^L(s)$ –tasvir, $f(t)$ –original) formuladan foydalanamiz. Teskari almashtirish quyidagi integral orqali amalga oshiriladi:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{st} f^L(s) ds = L^{-1}[f^L(s)]$$

Integral maxsus nuqtadan o'ng tomoga joylashgan yo'l bo'yicha olinadi.

Dissertatsiya ishida deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasining xususiy hosilali integro-differensial tenglamalarni yechish uchun “muzlatish”, o'zgaruvchilarni ajratish, Laplas, Myuller, va Gauss usullari qo'llanilgan. Matlab dasturi asosida yechiladi. Shunday qilib, bu bobda adabiyotlar taxlili, masalaning qo'yilishi va yechishning umumiy algoritmi keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Ko'p qatlamli dissipativ bir jinsli bo'lmagan to'liq o'tkazgichlarda xos to'liqlarning tarqalishi”** deb nomlangan uchinchi bobida garmonik xos to'liqlarning qovushqoq-elastik ko'p qatlamli silindrik qobiqlarda tarqalishi masalasi yechilgan. Dumaloq qovushqoq elastik silindrsimon qobiqning dispersiya munosabati $n > 1$ bo'lgan hol uchun quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{pmatrix} \bar{L}_{11}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{12}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{13}(\omega_R, s, n) \\ \bar{L}_{21}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{22}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{23}(\omega_R, s, n) \\ \bar{L}_{31}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{32}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{33}(\omega_R, s, n) \end{pmatrix} + \right. \\ & \left. + \Omega^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right] \begin{cases} U(s, n, \Omega) \\ V(s, n, \Omega) \\ W(s, n, \Omega) \end{cases} e^{i(\alpha x - \omega t)} e^{in\phi} = 0. \quad (20) \end{aligned}$$

Bu yerda

$$\Omega = \frac{\omega a}{c_L}, c_L = \left[\frac{E_0}{(\rho_0(1 - \nu_0^2))} \right]^{\frac{1}{2}}, s = \alpha a.$$

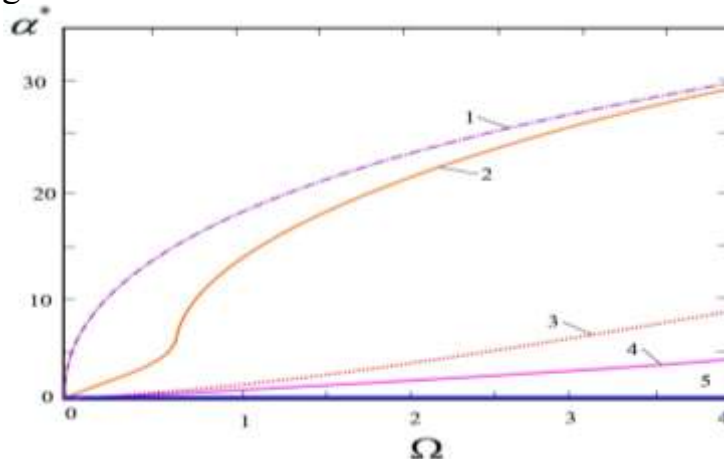
U holda differensial operator elementlari quyidagicha bo'ladi:

$$\begin{aligned} \bar{L}_{11} &= \left(s^2 + \left[\frac{1 - \nu_0}{2} \right] (1 + \beta^2) n^2 \right) \Gamma_{11}(\omega_R), \bar{L}_{12} = \left(\left[\frac{1 + \nu_0}{2} \right] s \right) \Gamma_{12}(\omega_R), \\ \bar{L}_{13} &= -i \left(\left(\nu_0 - \left[\frac{1 - \nu_0}{2} \right] \beta^2 n^2 \right) s + \beta^2 s^3 \right) \Gamma_{13}(\omega_R), \\ \bar{L}_{22} &= \left(\left[\frac{1 - \nu_0}{2} \right] (1 + 3\beta^2) s^2 + n^2 \right) \Gamma_{22}(\omega_R), \\ \bar{L}_{23} &= -i \left(n + n \left[\frac{3 - \nu_0}{2} \right] \beta^2 s^2 \right) \Gamma_{23}(\omega_R), \\ \bar{L}_{33} &= \{ [1 + \beta^2(1 - 2n^2)] + \beta^2(s^4 + 2n^2s^2 + n^4) \} \Gamma_{33}(\omega_R). \end{aligned} \quad (21)$$

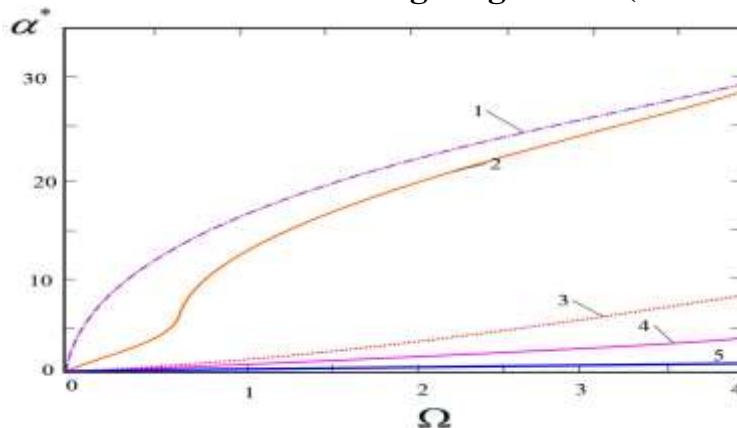
Yuqorida keltirilgan (21) tenglama dispersion munosabatni ifodalaydi. Bu tengamada qovushqoqlik parametrlari hisobga olinmasa, u holda

$$\begin{aligned} \Gamma_{11}(\omega_R) = \Gamma_{12}(\omega_R) = \Gamma_{13}(\omega_R) = \Gamma_{21}(\omega_R) = \Gamma_{22}(\omega_R) = \Gamma_{23}(\omega_R) = \\ = \Gamma_{31}(\omega_R) = \Gamma_{32}(\omega_R) = \Gamma_{33}(\omega_R) = 1 \end{aligned}$$

bo'ladi. Olingan natijalar asosida chastotaning eng kichik birinchi chastotasini beshta moddasi 2 va 3-rasmlarda to'liq soni va chastota orasidagi bog'liq o'zgarishi keltirilgan.



2-rasm. To'liq soni va chastota orasidagi bog'lanish (elastik sistema uchun)



3-rasm. To'liq soni va chastota orasidagi bog'lanish (qovushqoq-elastik sistema uchun) $A = 0,048$; $\beta = 0,05$; $\alpha = 0,1$; $\nu_0 = 0,33$.

Rasmda 1 – buralishdagi chastota bilan to‘lqin soni orasidagi munosabat, 2 – neosesimmetirik dispersimon munosabat haqiqiy qismi, 3 – bo‘ylama tebranishdagi chastota bilan to‘lqin soni orasidagi munosabat, 4 – ko‘ndalang tebranishdagi chastota bilan to‘lqin soni orasidagi munosabat, 5 – neosesimmetirik dispersion munosabat mavhum qismi rasmda tasvirlangan. O‘rganiladigan qovushqoq elastik materiallar uchun dyuralevoydan tayyorlangan qobiqlar hamda akrilondan foydalanilgan. Hisoblashlarda xos qiymatlarning absolyut xatoligi aniq tenglamalarga nisbatan $14 \cdot 10^{-6}$ atrofida bo‘ldi. Bu bobda silindrsimon qobiqdagi to‘lqin tarqalishining klassik muammosi qovushqoq-elastiklik xususiyatini hisobga olib ko‘rib chiqildi. Olingan natijalar analitik olingan natijalar bilan solishtirildi. Solishtirish natijalari 10 % farq qilishi topildi. Qovushqoqlik parametrlarini hisobga olish xos tebranishlar chastotasining 5 % kamaytirishi topildi. Dissertatsiya ishida to‘rt qatlamli suyuqliksiz dissipativ bir jinsli va bir jinsli bo‘lmagan silindrik jismda to‘lqin tarqalishi masalasi ko‘riladi. U holda chegaraviy shartlar (ichki va tashqi chegaralari yuklanishdan ozod qilingan, ikki qatlam chegarasida qattiq mahkamlanganlik sharti) quyidagi ko‘rinishni egallaydi:

$$\begin{aligned}
 r = r_0: \quad & \sigma_{rr0} = 0; \quad \sigma_{r\theta 0} = 0; \quad \sigma_{rz0} = 0; \\
 r = r_1: \quad & u_{r1} = u_{r2}; \quad u_{\theta 1} = u_{\theta 2}; \quad u_{z1} = u_{z2}; \\
 & \sigma_{rr1} = \sigma_{rr2}; \quad \sigma_{r\theta 1} = \sigma_{r\theta 2}; \quad \sigma_{rz1} = \sigma_{rz2}; \\
 r = r_2: \quad & u_{r2} = u_{r3}; \quad u_{\theta 2} = u_{\theta 3}; \quad u_{z2} = u_{z3}; \\
 & \sigma_{rr2} = \sigma_{rr3}; \quad \sigma_{r\theta 2} = \sigma_{r\theta 3}; \quad \sigma_{rz2} = \sigma_{rz3}; \\
 r = r_3: \quad & u_{r3} = u_{r4}; \quad u_{\theta 3} = u_{\theta 4}; \quad u_{z3} = u_{z4}; \\
 & \sigma_{rr3} = \sigma_{rr4}; \quad \sigma_{r\theta 3} = \sigma_{r\theta 4}; \quad \sigma_{rz3} = \sigma_{rz4}; \\
 r = r_4: \quad & \sigma_{rr4} = 0; \quad \sigma_{r\theta 4} = 0; \quad \sigma_{rz4} = 0.
 \end{aligned} \tag{22}$$

Misol tariqasida to‘rt qatlamli qovushqoq elastik silindrik qobiqqa to‘lqin tarqalishi masalasini ko‘ramiz. Buning uchun relaksatsiya yadrosi sifatida Rijanitsin Koltunovning uch parametrlilik kuchsiz singulyar yadrosidan foydalanamiz.

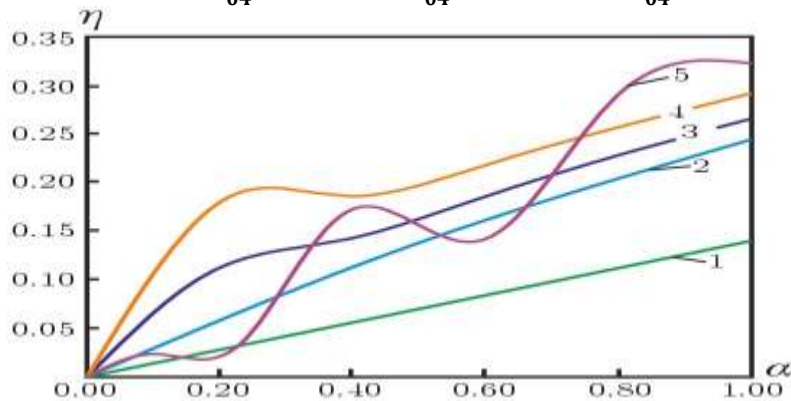
1-jadval.

To‘rt qatlamli silindrik qobiq uchun erkin tebranishlar chastotasini n bog‘liq o‘zgarishi

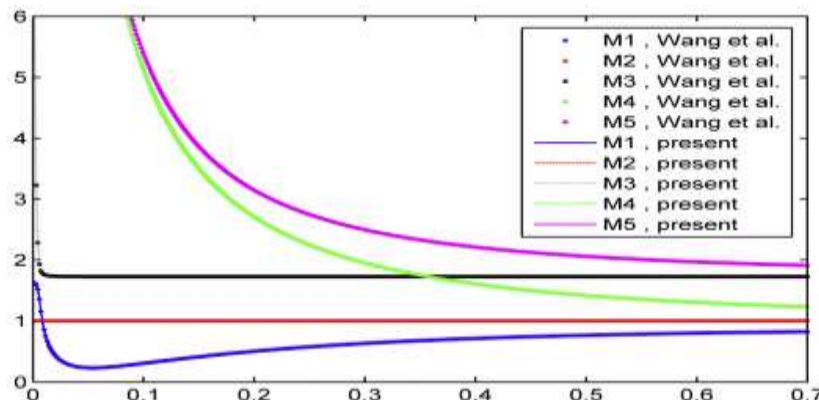
№	O‘lchamsiz xos chastotaning haqiqiy qismi					
	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5	Ω_6
0	0.36913	0.83335	1.34362	1.75354	2.34374	3.00328
	0.36919	0.83334	1.34362	1.75354	2.34374	3.00328
1	0.35885	0.53632	0.86722	1.17272	1.37979	1.75152
	0.35884	0.53632	0.86723	1.17273	1.37980	1.75153
2	0.37309	0.61399	0.95428	1.21002	1.47866	1.75287
	0.37308	0.61400	0.95428	1.21002	1.47867	1.75288
3	0.44122	0.71206	1.06769	1.27295	1.61076	1.78279
	0.44121	0.71206	1.06769	1.27295	1.61076	1.78280
4	0.55006	0.82384	1.18781	1.35816	1.71423	1.89819
	0.55006	0.82384	1.18781	1.35817	1.71424	1.89820

Barcha qatlamlar uchun $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.05$; $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 =$

$\alpha_4 = 0.1$ reologiya yadrosining amplitudasi turlicha bo'lishi mumkin: $A_1 = A_2 = 0,048$; $A_3 = A_4 = 0,01$. Puasson koeffitsiyenti $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \nu_4 = 0.25$. Sonli natijalar to'rt qatlamli silindrik qobiq uchun o'lchamsiz parametrlarda olingan. Natijalar 1-jadvalda ($\alpha = 0.25$) keltirilgan. Bu jadvalda qovushqoq elastik to'rt qatlamli silindrning o'qqa nisbatan simmetrik va simmetrik bo'lmagan tebranishlari o'rganilgan. Xos chastotalarni joylashishi Yung moduliga bog'liq bo'lar ekan. Hisoblashlarda $\frac{E_{01}}{E_{04}} = 1.5$, $\frac{E_{02}}{E_{04}} = 1.01$, $\frac{E_{03}}{E_{04}} = 0.95$.



4-rasm. Dekrement so'nish koeffitsiyentining to'liq soniga bog'liq o'zgarishi: 1-n=0; 2-n=4; 3-n=3; 4-n=2; 5-n=1 (2 chi moda)



5-rasm. Faza tezligining to'liq soniga bog'liq o'zgarishi n=0(1-5 ta moda)

So'nish dekrementini n-ning turli qiymatlari uchun to'liq soniga bog'liq o'zgarishi 4-rasmlarda keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, to'liq soni oshib borishi bilan so'nish dekrementining qiymati oshib boradi va asimtotaga yaqinlashib boradi. Ikki qatlamli qobiqqa to'liq tarqalishi masalasi T. Ro'ziyevning natijalari bilan solishtirildi. Ular 2-3 % farqi bilan ustma-ust tushadi. Faza tezligining uch qatlamli to'ldiruvchili qobiq uchun o'zgarishi o'rganildi. Faza tezligining haqiqiy qismini to'liq soniga bog'liq, uzun to'liqlar sohasida o'zgarishi 5-rasmda keltirilgan. Bu rasmda faza tezligining beshta modasini to'liq soniga bog'liq o'zgarishi keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, faza tezligining quyi modalari to'liq soniga kuchsiz bog'liq ekan. Yuqori modalari esa eksponensial ravishda kamayib, asimtotalarga yaqinlashib borar ekan.

Dissertatsiyaning “Ko'p qatlamli dissipativ bir jinsli bo'lmagan silindrik qobiqda majburiy to'liqning tarqalishi” deb nomlangan to'rtinchi bobida stasionar bo'lmagan kuch ta'sirida hosil bo'lgan dinamik kuchlanganlik deformatsiya holati masalasi yechilgan. Noturg'un kuch ta'sirida hosil bo'ladigan

dinamik jarayonlarni o'rganishda harakat differensial tenglamasini yechishda Laplasning integral almashtirishi qo'llaniladi. U holda yuqorida keltirilgan tenglamalar quyidagi ko'rinishni egallaydi:

$$\begin{aligned} C_{11}u_n^L + c_{12}w_n^L &= P_{1n}^L(s), \\ C_{21}u_n^L + c_{22}w_n^L &= P_{2n}^L(s), \\ C_{\alpha 0}^2(1 - \Omega_p^s(s)) \nabla^2 \Phi^L(r, s) - s^2 \Phi &= 0 \\ C_{\beta 0}^2(1 - \Omega_c^s(s)) \nabla^2 \Psi^L(r, s) - s^2 \Psi &= 0, \end{aligned} \quad (23)$$

bunda

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_{10}^2[n(n+1) - (1 - \nu_0)] + s^2; c_{12} = -c_{10}^2(\nu_0 + 1); \\ c_{21} &= -c_{10}^2(\nu_0 + 1)(n+1)n, \\ c_{22} &= 2c_{10}^2(\nu_0 + 1) + \left(1 + \frac{s^n f_n(s)}{m \Phi_n(s)}\right) s^2. \end{aligned}$$

Yuqorida keltirilgan (23) sistemani yechib, ko'chishlarni topish mumkin

$$u_n^L = \frac{c_{12}P_{1n}^L(s) - c_{22}P_{2n}^L(s)}{c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}}, \quad w_n^L = \frac{c_{11}P_{2n}^L(s) - c_{21}P_{1n}^L(s)}{c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}},$$

$$\Phi^L(r, s) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n K_{n+\frac{1}{2}}(\alpha_s r) + B_n N_{n+\frac{1}{2}}(\alpha_s r)),$$

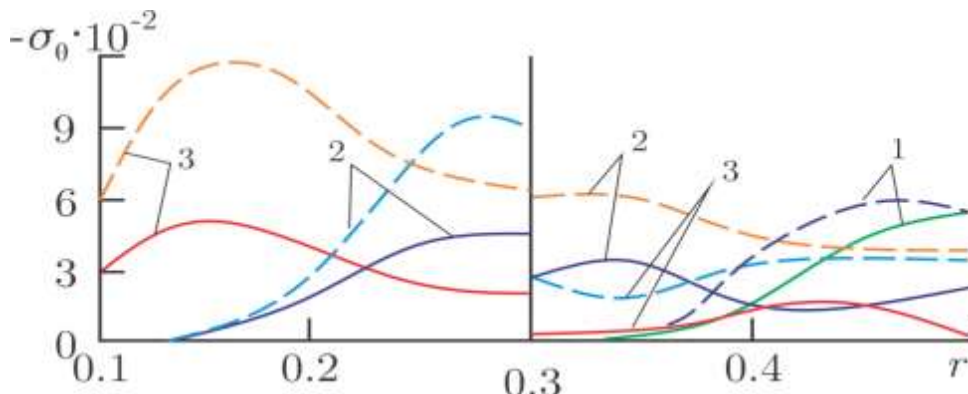
$$\Psi^L(r, s) = \sum_{n=0}^{\infty} (C_n K_{n+\frac{1}{2}}(\beta_s r) + M_n N_{n+\frac{1}{2}}(\beta_s r)),$$

$$\alpha_s^2 = \frac{s^2}{c_{\alpha 0}^2(1 - \Omega_p^s(s))}, \quad \beta_s^2 = \frac{s^2}{c_{\beta 0}^2(1 - \Omega_c^s(s))}. \quad (24)$$

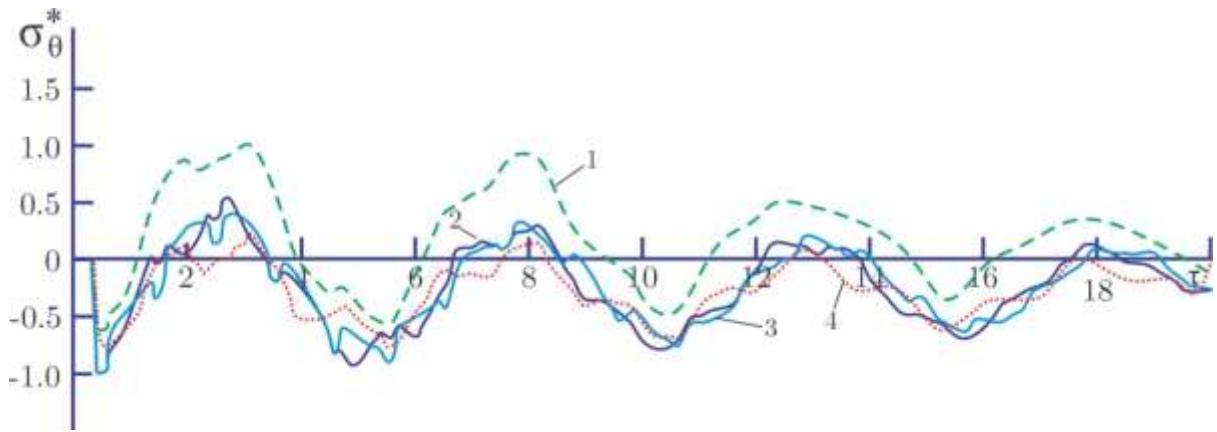
Oxirgi munosabatlar (23) va (24) da $K_n(X), N_n(X)$ –Bessel va Neymanning modifitsirlangan funksiyasi deyiladi. A_n, B_n, C_n, M_n –ixtiyoriy o'zgaras kattaliklar bo'lib, chegaraviy shartlardan foydalaniladi. Integral osti funksiyasi Jordan Lemasi bo'yicha hisoblanadi.

$$\int_C f(\zeta) d\zeta = 2\pi i \sum_{n=1}^m R_n,$$

Noturg'un kuchlar ta'siridagi kontur kuchlanishning vaqt bo'yicha o'zgarishi 8-rasmda keltirilgan ($\theta = 75^\circ$). Hisoblashlarda qatorning 35 hadi hisoblandi. Qo'yilgan masalalar vaqt bo'yicha Laplasning integral almashtirishi orqali hisoblandi. Teskari almashtirishlar chegaralar bilan yechiladi ($0 < t < T$).



6-rasm. Kontur kuchlanishning kesim bo'yicha taqsimlanishi (sitall-stal)

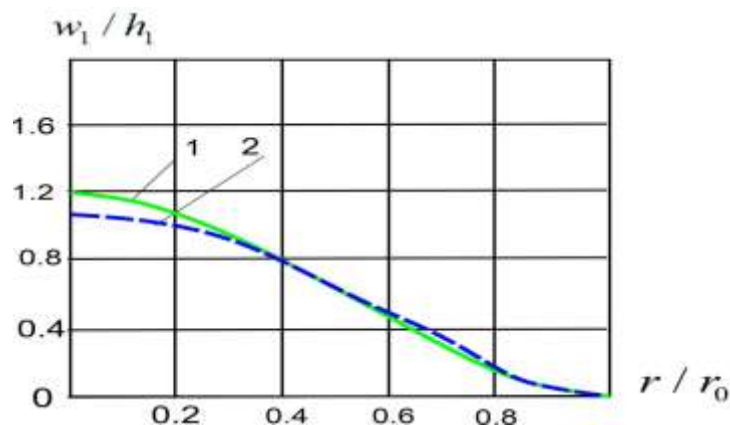


7-rasm. O'lchamsiz ($\sigma_\theta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_0}$) kontur kuchlanishning vaqt bo'yicha o'zgarishi.

Rasmda tasvirlangan egri chiziqlar quyidagi kattaliklar uchun olindi:

1. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 1.01, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 0.75, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.01, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65;$
2. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 0.91, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 1.05, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.01, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65;$
3. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 0.5, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 0.75, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.2, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65;$
4. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 0.41, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 1.5, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.01, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65;$
5. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 0.35, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 1.9, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.01, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65.$

Olingan natijalardan ko'rinib turibdiki, kontur kuchlanishlar materiallarning fiziko-mexanik xossalariga bog'liq ekan. Keyingi 5-rasmda uch qatlamli to'ldiruvchili silindrik qobiqda $F(t) = A \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right)[H(t) - H(t - T)]$ kuch ta'sir etgandagi normal ko'chishning o'zgarishi keltirilgan. Bunda A – ta'sir etadigan nagruzkani amplitudasi; $H(t)$ – Xevisayd funksiyasi; T – nagruzkani ta'sir etish davri; t – vaqt. Ta'sir etadigan nagruzkani amplitudasini $A = 60$ Pa, nagruzkani ta'sir etish davri $T = 25 \cdot 10^{-3}c$ bo'lsin va $0 \leq t \leq 20T$ oraliqda ta'sir etsin.



8-rasm. Ichki qobiq ko'chishining radiuslar nisbatiga bog'liq o'zgarishi
1. To'ldiruvchi elastik. 2. To'ldiruvchi qovushqoq elastik $k_1 = 0,01$

Rasmda ichki qobiq ko'chishining radiuslar nisbatiga bog'liq o'zgarishi keltirilgan: 1 – to'ldiruvchi elastik va 2 – to'ldiruvchi qovushqoq elastik $k_1 = 0,01$ bo'lgan hollar. Ko'chishlar vaqt o'tishi bilan oshib, 0,3 dan 0,35 oralig'ida maksimumga erishar ekan.

Sonli natijalarni tahlil qilish asosida qatlamli qobiq ko'chishlarining rezonans amplitudasini kontaktdagi qatlamlarning qovushqoqlik xususiyatlariga bog'liqligi 10-15 % ni tashkil etishi aniqlandi. Olingan natijalarni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, ko'p qatlamli qobiqlar uchun ishlab chiqilgan metodika va algoritmi to'ldiruvchili qobiq uchun ham qo'llash mumkinligi ko'rsatib berildi. Qobiqlarning dinamik holatini o'rganishda qobiqlar nazaryasini qo'llash sohalariga, ya'ni chastotaning kichik va yuqori bo'lishiga e'tiborli bo'lish talab etiladi. Aks holda juda katta xato natijalarga olib keladi (20 % gacha). Kirixgof-Lyav va Timoshenko gipotezasini past chastotali diapazonlarda qo'llash 20 % gacha farq qiladi va keyin mos keladi. Dissipativ bir jinsli bo'lmagan mexanik tizimlarda sinergik I.I.Safarov effekti o'z aksini topdi.

UMUMIY XULOSALAR

1. Ko'p qatlamli qovushqoq-elastik silindrik to'lqin o'tkazuvchiga (qatlamlar orasida turli xil kontakt shartlari bajarilganda materiallarning qovushqoqlik xossalari hisobga olgan holda xos to'lqinlarning tarqalish metodikasi, algoritmi va dasturi ishlab chiqilgan. Ishlab chiqilgan metodika matematik-fizika fanining maxsus funksiyalar usuli, Myuller, Laplas va Gauss usullari, hamda Grin-Lembning potentsiallariga asoslangan.

2. Materiallarning qovushqoqlik xossalari Bolsman-Volterning integral munosabatidan foydalanib olingan. Relaksatsiya yadrosi sifatida Rijanitsin-Koltunovning kuchsiz singulyar uch parametrli yadrosidan foydalanilgan.

3. Ko'p qatlamli qovushqoq-elastik silindrik to'lqin o'tkazuvchiga kontaktlar orasida turli xil kontakt shartlari bajarilganda tashqi yuklanish ta'sirida majburiy to'lqin tarqalish masalasi materialning qovushqoqlik xossalari masalaning qo'yilishi, yechish uslubi va algoritmi ishlab chiqilgan.

4. Agar muhitning inersiyasi hisobga olinmasa (Vinkler asosi) birinchi chastotaning qiymati 20 % gacha, ikkinchi chastotaning qiymati 5-10 % - gacha oshishi, hamda uchinchi chastotaning qiymati amalda o'zgarishligi aniqlangan.

5. Kirixgof-Lyav va Timoshenko gipotezasini past chastotali diapazonlarda qo'llanganda 20 % gacha farq qilgan va keyin mos kelgan. Dissipativ bir jinsli bo'lmagan mexanik tizimlarda sinergik I.I. Safarov effekti o'z aksini topgan.

6. Qobiqning nisbiy qattqlikni kamayishi kuchlanishlar konsentratsiyasini ham kamayishiga olib kelgan. Maksimal kuchlanishlar konsentratsiyasi uzun to'lqinlar sohasida sirpanuvchi kontaktda to'liq kontaktda qaraganda 20 % gacha ko'p bo'lishi topilgan. Uzun to'lqinlar sohasida qattiq mahkamlangan kontaktda urinma kuchlanishning to'lqin soniga nisbatan nomanoton o'zgarishi topilgan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ БУХАРСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

РУЗИЕВА МАВЛУДА АНВАРОВНА

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ ВОЛН В
МНОГОСЛОЙНОЙ ДИССИПАТИВНОЙ НЕОДНОРОДНОЙ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации доктора философии (Doctor of Philosophy) по физико-математическим
наукам**

Бухара – 2025

Тема диссертации на соискание учёной степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована с номером B2025.2.PhD/FM1310 В высшей аттестационной комиссии при министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан

Диссертация выполнена в Бухарском государственном техническом университете. Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Бухарского государственного технического университета ([www. https://bstu.uz/](http://www.https://bstu.uz/)) и на Информационно-образовательном портале “Ziyonet” (www.ziyonet.uz)

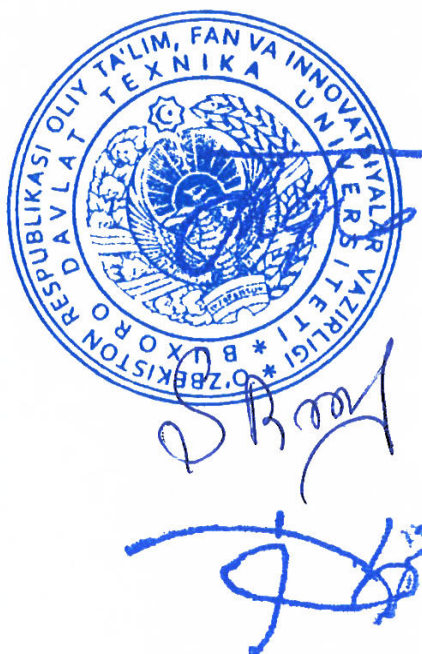
Научный руководитель:	Сафаров Исмоил Иброхимович доктор физико-математических наук (DSc)
Официальные оппоненты:	Мавланов Тулкин Мавлонович доктор технических наук, профессор Индиаминов Равшан Шукурович доктор физико-математических наук, профессор
Ведущая организация:	Наманганский государственный технический университет

Защита диссертации состоится 28-октября 2025 г. 11:30 часов на заседании научного совета Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 при Бухарском государственном техническом университете по адресу: 200100, г.Бухара, ул. К. Муртазаева, 15. Тел.: (+99865) 223-78-84; факс: (+99865) 223-79-72, E-mail: bstu_info@edu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарского государственного технического университета (зарегистрирована за №474). (Адрес:Бухарская область, 200100, г. Бухара, ул. К. Муртазаева, 15. Тел.: (+99895) 604-44-70).

Автореферат диссертации разослан 14-октября 2025 года.

(протокол рассылки №8 от 29-августа 2025 г.)



М.Х. Тешаев
Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук (DSc), профессор.

Р.А. Сабирова
Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, кандидат физико-математических наук (PhD).

З.И. Болтаев
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических (DSc), профессор.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире изучение динамических процессов, происходящих под воздействием колебаний элементов вязкоупругих многослойных конструкций и внешних нагрузок, исследование динамики многослойных элементов инженерных конструкций, применяемых в различных областях строительства и техники, применение современных методов и алгоритмов расчета занимает одно из ведущих мест. В мировом масштабе многослойные неоднородные цилиндрические оболочки на подводных лодках, в некоторых устройствах летательных аппаратов, для повышения прочности механических систем современные элементы и устройства машин требуют использования композиционных материалов, работающих под различными динамическими (вибрационными и ударными) силами, учитывающих энергодиссипативные свойства, и внедрения новых методов расчета их динамических характеристик.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на создание надежных методов и алгоритмов расчета многослойных конструкций, обеспечивающих минимальное распределение концентрации напряжений в динамическом состоянии. В связи с этим особое внимание уделяется целенаправленным научным исследованиям, направленным на разработку эффективной методики и алгоритма расчета динамических процессов в многослойных конструкциях с различными вязкостными свойствами под воздействием динамических нагрузок, определение напряженно-деформированного состояния элементов различных типов надземных и подземных инженерных сооружений.

В нашей республике в этом направлении большое место занимает оценка резонансного состояния конструкций с учетом вязкостных параметров, данное состояние позволяет не только понять сущность диссипации энергии в динамическом процессе для многослойной среды, но и разработать методы ее определения, а также осуществляются широкомасштабные мероприятия по определению и оптимизации диссипативных характеристик, а также по изучению динамического напряженно-деформированного состояния структурно неоднородных протяженных многослойных механических систем и достигаются определенные результаты. Указом Президента Республики Узбекистан от 30 мая 2022 года № УП-144 “О мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности Республики Узбекистан”¹ определены важные задачи. При выполнении этих задач, в том числе при расчете напряжений материалов в динамическом состоянии, важное значение приобретает широкое внедрение математического моделирования и разработки программных систем с учетом реологических свойств используемых материалов.

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан от 30 мая 2022 года № УП-144 “О мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности Республики Узбекистан”

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года “О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан,”² № УП-5853 от 23 октября 2019 года “О мерах по коренному повышению эффективности системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций,”³ Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-3190 от 9 августа 2017 года “О мерах по дальнейшему развитию сейсмостойкого строительства и проведения научных исследований в области сейсмологии населения и территории Республики Узбекистан,” № ПП-4708 от 7 мая 2020 года “О мерах по совершенствованию качества образования и 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 диссертационное исследование выполнено в соответствии с IV. “Математика, механика, сейсמודинамика сооружений и информатика” и XIV. “Сейсмология, сейсмическая безопасность зданий и сооружений и строительство.”

Степень изученности проблемы. Следующие зарубежные ученые провели научный анализ распространения волн в вязкоупругих трехслойных цилиндрических телах: Илюшин А.А., Бреховских Л.В., Волмир А.С., Викторов И.А., Горшков А.Г., Генкин М.Д., Шемякин Ю.И., Трояновский И.Е., Кийко И.А., Гузь А.Н., Гринченко В.Т., Комиссарова Г.Л., Нигуль У.К., Гоголадзе В.Г., Молотков Л.А., Новичков Ю.И., Петрашен Г.И., Крауклис П.В., Фролов К.В., Антонов А.Н., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Старовойтов Э.И., Анофрикова Н.С., Микер Т., Мейслер А., Дейвис Р.М., Митра Р., Кольский Г., Ахенбах Ж.Д., Шафер Б.В., Сан Р.И. и ученые нашей республики: Рахматулин Х.А., Уразбаев М.Т. Ширинкулов Т.Ш., Кабулов В.К., Рашидов Т.Р., Мубараков Ю.Н., Мардонов Б.М., Хожметов Г.Х., Ишанходжаев А.А., Мавлонов Т.М., Мирсаидов М.М., Султанов К.С., Маматкулов Ш.М., Бадалов Ф.Б., Абдусаторов А., Сафаров И.И., Худайназаров Х., Тешаев М.Х., Юлдашев Ш.С. и другие провели научный анализ колебаний пластинчатых и оболочечных механических систем при различных воздействиях (или при отсутствии внешних нагрузок) с учетом реологических свойств материала.

В настоящее время существует ряд проблем, связанных с динамикой вязкоупругих механических систем (диссипативно однородных и неоднородных), решение которых позволяет открыть новые грани проблемы распространения волн. Создание надежных методов и алгоритмов позволяет решать многие задачи динамической прочности и устойчивости в

² Постановление Президента Республики Узбекистан от 16 мая 2023 года № ПП-158 “О дополнительных мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан”

³ Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-4794 от 30.07.2020 г. “О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан.”

машиностроении.

Вместе с тем, до настоящего времени теоретические основы и методы решения задач диссипации энергии в вязкоупругих механических системах не разработаны в полной мере, теоретическая задача не поставлена математически, не разработаны методы и алгоритмы решения для получения численных результатов. Выбор ядра и его реологических параметров для вязкоупругих механических систем требует изучения их влияния на частоту и коэффициент демпфирования, и поэтому данная системная проблема требует дальнейших научных исследований.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертация выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Бухарского государственного технического университета в рамках проекта №ОТ-Ф4-01 "Актуальные проблемы математики и механики," рассчитанного на 2021-2026 годы.

Целью исследования Создание методики и алгоритма исследования распространения собственных и вынужденных волн, характерных для диссипативно неоднородных многослойных цилиндрических тел, а также совершенствование научных основ существующей теории.

Задачи исследования:

разработка математической постановки, методов и алгоритма решения задач распространения собственных и вынужденных волн многослойных цилиндрических тел (оболочек) конечной длины с учетом вязкоупругих свойств материалов;

построение дисперсионного соотношения в зависимости от нескольких мод частот для структурно-диссипативных неоднородных механических систем;

оценка влияния механических и геометрических параметров на зависимости между амплитудой и частотой для оценки резонансного состояния при вибрационной нагрузке;

сравнительная оценка зависимости напряженно-деформированного состояния структурно-диссипативных неоднородных механических систем при внешних гармонических нагрузок от физико-механических и геометрических параметров.

Объектом исследования в качестве двух, трех и четырехслойного длинного вязкоупругого цилиндрического тела.

Предметом исследования развитие динамической теории неоднородных механических систем с учетом вязкоупругих свойств, методики расчета и разработку алгоритма, основанного на комплексной арифметике, для изучения спектральных задач.

Методы исследования. В процессе исследования для решения системы интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, полученных в диссертационной работе, использовались метод "замораживания," метод разделения перемен, метод ортогональной прогонки Годунова и методы Мюллера, Гаусса, Лапласа.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

первые разработаны методика и алгоритм решения задач распространения собственных и вынужденных волн в многослойной диссипативной неоднородной цилиндрической оболочке с учетом вязкоупругих свойств материалов через ядро Колтунова-Ржаницына на основе интегральных преобразований Лапласа, замораживания, методов Гаусса и Мюллера;

обнаружено, что первая, вторая, третья и четвертая собственные частоты диссипативных однородных и неоднородных цилиндрических тел с многослойными (двумя, тремя и четырьмя) слоями отличаются от действительных частей до 5 %, а мнимые части радикально изменяются;

Диссипативно неоднородная четырехслойная цилиндрическая оболочка имеет вогнутость первой моды фазовой скорости в диапазоне волнового числа $0 \leq \eta \leq 0.1$, первая и третья моды фазовой скорости практически не зависят от волнового числа $0.1 \leq \eta \leq 0.6$, зависят от волнового числа в диапазоне высших мод, а при $\eta > 0.6$ не зависят от дисперсионных соотношений;

Установлено, что значение амплитуды перемещения двухслойной оболочки на внутреннем свободном уровне зависит от вязкостных свойств материала на уровне 10-15 %, а результаты, полученные на основе гипотез Кирхгофа-Лява и Тимошенко, составляют до 20 % на низких частотах и 10 % на высоких частотах.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

в результате немонотонной зависимости коэффициента декремента затухания, полученные результаты для диссипативных неоднородных механических систем зависят от различных параметров, предложены методы решения многих практических задач в различных областях новых технологий;

разработанные методики и алгоритмы позволяют уменьшить колебания радиоэлектронного оборудования (РЭО), а также оптимизировать напряженно-деформированные состояния в резонансных областях механических систем.

Достоверность результатов исследования обоснована это объясняется корректной постановкой задачи, строгостью математических соотношений, использованием известных и широко используемых методов решения и сравнениями с решениями задач, полученными другими учеными.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

вклад в развитие теории распространения вынужденных волн, характерных для многослойных вязкоупругих цилиндрических тел.

в диссипативно-неоднородных механических системах декремент позволяет управлять энергией в исследуемой области из соотношения изменения коэффициента затухания в зависимости от геометрических и физико-механических параметров. Это объясняется тем, что разработанный алгоритм и программа позволяют использовать и для снижения вибраций.

Внедрение результатов исследований. На основе полученных результатов по методу, алгоритму и программе расчета с учетом научных

основ линейных свободных и вынужденных колебаний трехслойного диссипативного неоднородного цилиндрического тела:

Результаты, полученные в результате гашения амплитуды колебаний в диссипативных неоднородных системах, были использованы в Ташкентском химико-технологическом институте при реализации проекта ОТ-Ф4-01 “Разработка методов и развитие теории изучения нелинейного динамического напряженно-деформированного состояния криволинейных участков многослойных композитных труб, по которым течет вязкая жидкость, под воздействием температуры и динамических нагрузок” (справка Ташкентского химико-технологического института № 1/01-1820 от 25 мая 2025 г.). В результате создана возможность управления колебаниями в резонансной области трубы;

Разработанная в диссертации методика решения задачи распространения волн в тонкой цилиндрической оболочке с длинным вязкоупругим наполнителем была использована в фундаментальном проекте РФФИ-18-48-240007 “Мультиверсионный метод повышения информационной надежности производственно-экологического мониторинга тепловых электростанций,” выполненном в 2018-2020 годах в рамках государственной научно-технической программы Российского фонда фундаментальных исследований (справка № 177-40 от 10 июля 2025 года Красноярского краевого Дома науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений). В результате появилась возможность создания теоретических основ производственно-экологического мониторинга и математического моделирования процессов для оценки обобщенного критерия качества.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций доктора философии (PhD), в том числе 2 в республиканских и 2 в зарубежных журналах.

Структура и объем Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 104 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации обоснованы актуальность и востребованность проведенного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризованы объект и предмет, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов и раскрыта их научная и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов исследования в практику, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации “**Анализ литературы, посвященной изучению распространения собственных и вынужденных гармонических**

волн в многослойной вязкоупругой цилиндрической оболочке” проведен краткий анализ литературы, посвященной изучению состояния динамических процессов, возникающих в результате распространения собственных волн и внешней нагрузки на вязкоупругую многослойную цилиндрическую оболочку. В результате анализа литературы были сделаны следующие выводы:

применяемые методы и задачи волновой динамики изучены в основном для диссипативно-однородной, т.е. вязкоупругой цилиндрической оболочки; результаты анализа показывают, что гармонические волны, воздействуя на сооружения, создают сложное волновое поле, которое целесообразно изучать только методами волновой динамики;

Показано, что в ряде случаев, при расчете резонансных состояний, возникающих при воздействии гармонических волн на сооружения при контакте со средой, пренебрежение вязкоупругими свойствами среды может привести к большим ошибкам.

Во второй главе диссертации, озаглавленной “Постановка, методика и алгоритм решения задач распространения собственных волн и нахождения напряженно-деформированного состояния под действием вынужденных сил в многослойной вязкоупругой цилиндрической оболочке,” представлена математическая постановка, методика и алгоритм решения задачи нагружения собственных и гармонических волн на многослойные цилиндрические оболочки. Данная глава состоит из двух параграфов, в первом параграфе изложены постановка и методика решения задач распространения волн на вязкоупругую многослойную цилиндрическую оболочку. Во втором параграфе представлены методика и алгоритм изучения динамического процесса, возникающего под воздействием распространения гармонических волн и внешней нагрузки на многослойную вязкоупругую цилиндрическую оболочку. Пусть в цилиндрической системе координат дана система многослойных цилиндрических оболочек, как показано на рис. 1. Рассмотрим задачу распространения волн, присущую системе вложенных цилиндрических оболочек.

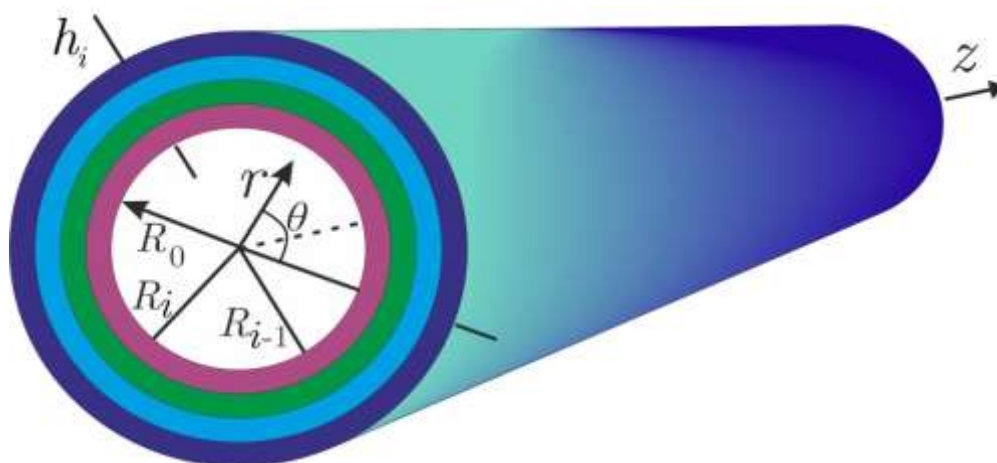


Рис. 1. Расчетная схема многослойного цилиндра

Рассмотрим бесконечный ($-\infty < z < \infty$) и полубесконечный ($0 < z < \infty$) цилиндры. Внешний и внутренний слой цилиндра могут состоять из тонкой

цилиндрической оболочки. Дифференциальное уравнение движения слоев цилиндра, описывающее распространение волны, выглядит следующим образом.

$$(\tilde{\lambda}_j + 2\tilde{\mu}_j) \text{graddiv} \vec{u}_j - \tilde{\mu} \text{rotrot} \vec{u}_j = \rho_j \frac{\partial^2 \vec{u}_j}{\partial t^2}, \quad (j = 1, 2 \dots N) \quad (1)$$

где $\tilde{\lambda}_j$ и $\tilde{\mu}_j$ модули упругости в операторной форме

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_j f(t) &= \lambda_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_\lambda^{(i)}(t - \tau) f(\tau) d\tau \right], \tilde{\mu}_j f(t) \\ &= \mu_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_\mu^{(i)}(t - \tau) f(\tau) d\tau \right]; \end{aligned}$$

$f(t)$ — произвольная непрерывная функция; $R_\mu^{(i)}(t - \tau)$ и $R_\lambda^{(i)}(t - \tau)$ — ядра релаксации; λ_{0j}, μ_{0j} — мгновенные модули упругости слоев. Изучены динамические свойства механической системы в тех случаях, когда жесткие контакты выполняют три условия контакта: жесткое крепление, скользящий контакт и тонкий бесмассовый слой.

Если внутренняя и внешняя оболочки многослойной цилиндрической оболочки представляют собой тонкий цилиндр, то можно использовать уравнение тонкой оболочки, основанное на гипотезах (Крихгофа-Лява или Тимошенко), уравнение колебаний оболочки с операторными коэффициентами будет следующим:

$$L \tilde{E} \vec{u} = \frac{(1 - \nu_0^2)}{E_0 h_0} \vec{p} + \rho_0 \frac{(1 - \nu_0^2)}{E_0} \left(\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \right), \quad (k = 1, 3 \dots N) \quad (2)$$

Где: $\tilde{E} f(t) = E_{01} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_E(t - \tau) f(\tau) d\tau \right]$, $R_E^{(i)}(t - \tau)$ — ядро релаксации; E_0 —

мгновенный модуль упругости оболочки, h_0 — толщина оболочки, ν_0 — коэффициент Пуассона,

L

$$= \begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1 - \nu_0}{2R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} & \frac{1 + \nu_0}{2R} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \theta} & \frac{\nu_0}{R} \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{1 + \nu_0}{2R} \frac{\partial^2}{\partial z \partial \theta} & \frac{1 + \nu_0}{2} (1 + 4a) \frac{\partial^2}{\partial z^2} + (1 + a) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} & \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} - a(2 - \nu) \frac{\partial^3}{\partial z^2 \partial \theta} - \frac{a}{R^2} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \\ \frac{\nu}{R} \frac{\partial}{\partial z} & \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} - a(2 - \nu) \frac{\partial^3}{\partial z^2 \partial \theta} - \frac{a}{R^2} \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} & \frac{1}{R^2} + a \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right)^2 \end{pmatrix},$$

$\vec{u} = \vec{u}(u_r, u_\theta, u_z)$ — вектор смещения поверхности срединной оболочки (когда справедливы гипотезы Кирхгофа-Лява), часто вводят следующие обозначения ($u_r = u$; $u_\theta = v$; $u_z = w$).

Если цилиндрическое тело состоит из слоев, то его уравнения движения будут иметь вид (1). Между слоями накладывается условие жесткой фиксации

$$r = a_j: \quad \sigma_{rrj} = \sigma_{rr(j+1)}; \quad \sigma_{r\theta j} = \sigma_{r\theta(j+1)}; \quad \sigma_{rzj} = \sigma_{rz(j+1)};$$

$$u_j = u_{j+1}; \quad v_j = v_{j+1}; \quad w_j = w_{j+1}. \quad (3)$$

Между слоями накладывается условие скольжения (если между слоями нет сопротивления)

$$\begin{aligned} r = a_j: \quad \sigma_{rrj} = \sigma_{rr(j+1)}; \quad \sigma_{r\theta j} = \sigma_{rzj} = 0; \\ \sigma_{r\theta(j+1)} = \sigma_{rz(j+1)} = 0; \quad w_j = w_{j+1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Если между слоями поместить безмассовый элемент, то граничное (контактное) условие для случая плоской деформации будет следующим:

$$\begin{aligned} r = a_j: \quad \sigma_{rrj} = \sigma_{rr(j+1)}; \quad \sigma_{r\theta j} = \sigma_{r\theta(j+1)}; \\ \sigma_{rrj} = \bar{k}_r(u_{rj} - u_{r(j+1)}); \\ \sigma_{r\theta j} = \bar{k}_\theta(u_{\theta j} - u_{\theta(j+1)}). \end{aligned} \quad (5)$$

Если внутренняя поверхность первого слоя $r = a_1$ свободна от напряжений, то накладывается следующее условие:

$$r = a_N: \quad \sigma_{rrN} = 0; \quad \sigma_{r\theta N} = 0; \quad \sigma_{rzN} = 0. \quad (6)$$

Свободный край оболочки, т.е. при $z=0$

$$\sigma_{zzj} = \sigma_{rzj} = \sigma_{\theta zj} = 0. \quad (7)$$

В некоторых случаях, если необходимо создать вынужденную резонансную волну, при $z=0$ накладывается следующее условие:

$$\sigma_{zz} = T_g(r) \cos p \theta e^{-i\omega t}, \quad \sigma_{rz} = \sigma_{\theta z} = 0. \quad (8)$$

Здесь $T_g(r)$ — функция, заданная в задаче и выбираемая в зависимости от постановки задачи. Если $z \rightarrow \infty$, то условие — отсутствие источника энергии, либо условие — поглощение волны.

Предположим, что многослойная цилиндрическая оболочка закреплена на безмассовых деформируемых элементах (инерционных элементах). Это также называется базисом Винклера. Для цилиндрической трубы в цилиндрической системе координат это выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k; \quad q_{1\theta}^k = 0, \\ \tilde{k}_r^k [f(t)] = k_{r0}^k \left[f(t) - \int_0^t R_k(t - \tau) f(\tau) d\tau \right], \end{aligned} \quad (9)$$

k_{r0}^k — коэффициент лука, $R_k(t - \tau)$ — ядро относительности. Если берется базис Винклера, то используется (9) с учетом силы инерции базиса и определяется следующим образом

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k - m_f \ddot{w}^k, \quad (10)$$

где m_f — эффективная масса основания. Если влияние окружающей среды на трубу рассчитывается по модели Пастернака, то

$$q_r^k = -\tilde{k}_{r1}^k w^k - t_f \Delta w^k, \quad (11)$$

Здесь t_f — коэффициент сдвига, \tilde{k}_{r1}^k — коэффициент оператора сжатия. Помимо граничных и контактных условий задаются также начальные условия.

$$\vec{u}_j |_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial \vec{u}_j}{\partial t} |_{t=0} = 0. \quad (12)$$

Здесь $\sigma_{rrj}, \sigma_{r\theta j}, \sigma_{\theta\theta j}, \sigma_{rzj}$ — компоненты тензора напряжений, $u_{rj}, u_{\theta j}, u_{zj}$ — компоненты вектора смещения, ρ_j — плотность материала.

Решим уравнения многослойной цилиндрической оболочки (1) с помощью преобразования Грина-Лэмба. Затем вектор смещения в последнем полученном уравнении представим в потенциальной и соленоидальной форме. Смещение слоев будет следующим:

$$\vec{u}_j = \text{grad}\phi_j + \text{rot}\vec{\psi}_j, \text{div}\vec{\psi} = 0, \quad (13)$$

Если взять пространственно-многослойную цилиндрическую оболочку, то уравнение потенциала смещения принимает вид:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi_j - \frac{1}{c_{pj}^2 \Gamma_{kj}} \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial t^2} &= 0; & \nabla^2 \psi_{zj} - \frac{1}{c_{sj}^2 \Gamma_{kj}} \frac{\partial^2 \psi_{zj}}{\partial t^2} &= 0; \\ \nabla^2 \psi_\theta - \frac{\psi_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_r}{\partial \theta} - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_k} \frac{\partial^2 \psi_\theta}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \psi_r - \frac{\psi_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_\theta}{\partial \theta} - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_k} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь

$$c_p^2 = \frac{\lambda_{01} + 2\mu_{01}}{\rho}; \quad c_s^2 = \frac{\mu_{01}}{\rho},$$

$$\Gamma_{kj} = 1 - \Gamma_j^c(\omega) - i\Gamma_j^s(\omega),$$

$$\Gamma_{\lambda j}^c = \Gamma_{\mu j}^c = \Gamma_j^c, \quad \Gamma_{\lambda j}^s = \Gamma_{\mu j}^s = \Gamma_j^s,$$

$$R_{\lambda j} = R_{\mu j} = R_j.$$

Решение уравнения (14) выше находится следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \phi_j(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \phi_{jn}(\alpha_j r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{rj}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{rjn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ -\cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{\theta j}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{\theta jn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{zj}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{zjn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ \cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Где n — целое число; γ_p — постоянная распространения волны; ω — комплексная частота; $r = \frac{r_1}{a_0}$, $z = \frac{z_1}{a_0}$. Если подставить (15) в (14), то получим следующие обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \phi_{jn}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\phi_{jn}}{dr} + \left(\alpha_j^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \phi_{jn} &= 0; \\ \frac{d^2 \psi_{zjn}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{zjn}}{dr} + \left(\beta_j^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \psi_{zjn} &= 0; \\ \frac{d^2 \psi_{\theta jn}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{\theta jn}}{dr} + \frac{1}{r^2} (-n^2 \psi_{\theta jn} + 2n\psi_{\theta jn} - \psi_{\theta jn}) + \beta_j^2 \psi_{\theta jn} &= 0; \\ \frac{d^2 \psi_{rjn}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{rjn}}{dr} + \frac{1}{r^2} (-n^2 \psi_{rjn} + 2n\psi_{\theta jn} - \psi_{rjn}) + \beta_j^2 \psi_{rjn} &= 0; \end{aligned} \quad (16)$$

Включены следующие обозначения:

$$\alpha_j^2 = \frac{\bar{\Omega}_j^2}{\gamma_j^2} - \gamma_p^2; \quad \beta_j^2 = \bar{\Omega}_j^2 - \gamma_p^2; \quad \bar{\Omega}_j = \frac{\omega a_j}{\bar{c}_{sj}}; \quad \gamma_j^2 = \frac{2(1 - \nu_j)}{1 - 2\nu_j}.$$

Решения уравнений выражаются функциями Бесселя и Ганкеля n -го порядка рода 1 и 2:

$$\begin{aligned} \phi_j &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[A_{nj} H_n^{(1)}(\alpha_j r) + A'_{nj} H_n^{(2)}(\alpha_j r) \right] \cos n \theta e^{-i\omega t}, \\ \vec{\psi}_N &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[\vec{M}_{nN} H_n^{(1)}(\beta_N r) + \vec{L}_{nN} H_n^{(2)}(\beta_N r) \right] \sin n \theta e^{-i\omega t}, \\ \vec{\psi}_j &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[\vec{B}_{nj} H_n^{(1)}(\beta_j r) + \vec{B}_{nj} H_n^{(2)}(\beta_j r) \right] \sin n \theta e^{-i\omega t} \\ \phi_N &= \sum_{n=0}^{\infty} \left[C_{nN} H_n^{(1)}(\alpha_N r) + D_{nN} H_n^{(2)}(\alpha_N r) \right] \cos n \theta e^{-i\omega t}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $A_{nj}, A'_{nj}, \vec{B}_{nj}, \vec{B}_{nj}$ – произвольные константы, которые находятся из граничных условий; $H_n^{(1)}(\alpha_j r)$ и $H_n^{(2)}(\alpha_j r)$ – Функции Ганкеля соответственно

$$H_n^{(1),(2)}(\alpha r) = J_n(\alpha r) \pm iN_n(\alpha r).$$

Если использовать граничные условия (3.3)-(3.6) для нахождения произвольных постоянных, то получим систему алгебраических уравнений с неоднородными комплексными коэффициентами

$$[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)]\{q\} = \{P_2\}, \quad (18)$$

где $\{q\}$ — вектор-столбец, состоящий из произвольных констант; $\{R1\}, \{R2\}$ — вектор-столбцы под воздействием внешней падающей волны; $[C1], [C2]$ — квадратные матрицы, элементами которых являются функции Бесселя и Ганкеля. Данная система алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами (18) решается по разработанному в диссертации алгоритму с использованием метода Гаусса последовательного исключения переменных. Если внешняя падающая волна не учитывается, то находятся частоты свободных колебаний сферического тела, находящегося в вязкоупругой среде.

В этом случае (18) дает алгебраическое уравнение, состоящее из комплексных трансцендентных функций в комплексной форме. Решить его можно только численными методами. При решении уравнения (18) на каждом шаге интегрирования используется метод Гаусса. Поэтому нет необходимости выражать определитель в виде полинома. При нахождении комплексных корней метод Мюллера находится быстро с высокой точностью и обеспечивает сходимость.

Для решения задачи, связанной с приложением нестационарных сил к многослойной цилиндрической оболочке, используется интегральное преобразование Лапласа по времени ($0 < t < T_1$),

$$f^L(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt = L[f(t)] \quad (19)$$

Teskari almashtirish, ya'ni originalni topish uchun ($f^L(s)$ –tasvir, $f(t)$ –original) quyidagi formuladan foydalanamiz. Teskari almashtirish quyidagi integral orqali amalga oshiriladi.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} e^{st} f^L(s) ds = L^{-1}[f^L(s)]$$

Интеграл берется по пути от особой точки вправо.

В диссертационной работе для решения интегро-дифференциальных уравнений со специальными производными механики деформируемого твердого тела используются методы “замораживания”, разделения переменных, Лапласа, Мюллера и Гаусса. Решение основано на программе Matlab. Таким образом, в данной главе представлен анализ литературы, общий алгоритм постановки задачи и решение.

В третьей главе диссертации **“Распространение собственных волн в многослойных диссипативных неоднородных волноводах”** решена задача распространения гармонических собственных волн в вязкоупругих многослойных цилиндрических оболочках. Соотношение дисперсии круглой вязкоупругой цилиндрической оболочки для случая $n > 1$ имеет следующий вид.

$$\begin{aligned} & \left[\begin{pmatrix} \bar{L}_{11}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{12}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{13}(\omega_R, s, n) \\ \bar{L}_{21}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{22}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{23}(\omega_R, s, n) \\ \bar{L}_{31}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{32}(\omega_R, s, n) & \bar{L}_{33}(\omega_R, s, n) \end{pmatrix} + \right. \\ & \left. + \Omega^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right] \begin{Bmatrix} U(s, n, \Omega) \\ V(s, n, \Omega) \\ W(s, n, \Omega) \end{Bmatrix} e^{i(\alpha x - \omega t)} e^{in\phi} = 0. \quad (20) \end{aligned}$$

Здесь

$$\Omega = \frac{\omega a}{c_L}, c_L = \left[\frac{E_0}{(\rho_0(1 - \nu_0^2))} \right]^{\frac{1}{2}}, s = \alpha a.$$

В горах элементы дифференциального оператора будут следующими:

$$\begin{aligned} \bar{L}_{11} &= \left(s^2 + \left[\frac{1 - \nu_0}{2} \right] (1 + \beta^2) n^2 \right) \Gamma_{11}(\omega_R), \bar{L}_{12} = \left(\left[\frac{1 + \nu_0}{2} \right] s \right) \Gamma_{12}(\omega_R), \\ \bar{L}_{13} &= -i \left(\left(\nu_0 - \left[\frac{1 - \nu_0}{2} \right] \beta^2 n^2 \right) s + \beta^2 s^3 \right) \Gamma_{13}(\omega_R), \\ \bar{L}_{22} &= \left(\left[\frac{1 - \nu_0}{2} \right] (1 + 3\beta^2) s^2 + n^2 \right) \Gamma_{22}(\omega_R), \\ \bar{L}_{23} &= -i \left(n + n \left[\frac{3 - \nu_0}{2} \right] \beta^2 s^2 \right) \Gamma_{23}(\omega_R), \end{aligned}$$

$$\bar{L}_{33} = \{[1 + \beta^2(1 - 2n^2)] + \beta^2(s^4 + 2n^2s^2 + n^4)\} \Gamma_{33}(\omega_R). \quad (21)$$

Приведенное выше уравнение (21) представляет собой дисперсионное соотношение. Если это уравнение не учитывает параметры вязкости, то

$$\Gamma_{11}(\omega_R) = \Gamma_{12}(\omega_R) = \Gamma_{13}(\omega_R) = \Gamma_{21}(\omega_R) = \Gamma_{22}(\omega_R) = \Gamma_{23}(\omega_R) = \\ = \Gamma_{31}(\omega_R) = \Gamma_{32}(\omega_R) = \Gamma_{33}(\omega_R) = 1$$

На основании полученных результатов зависимость между волновым числом и частотой представлена на рисунках 2 и 3.

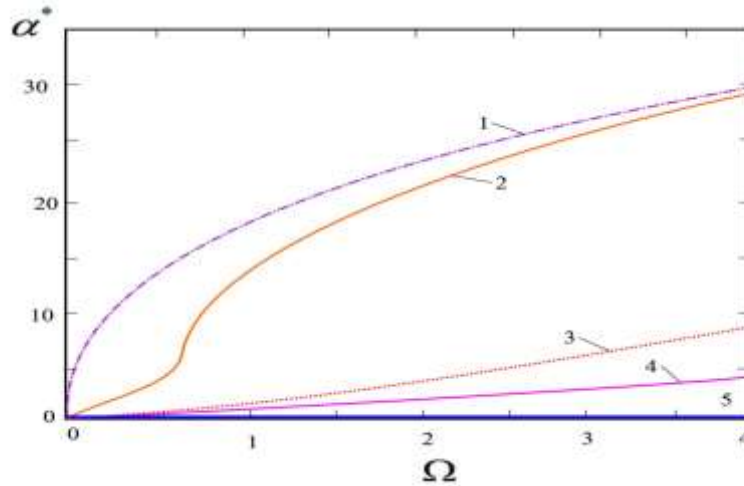


Рис. 2. Соотношение между волновым числом и частотой (для упругой системы)

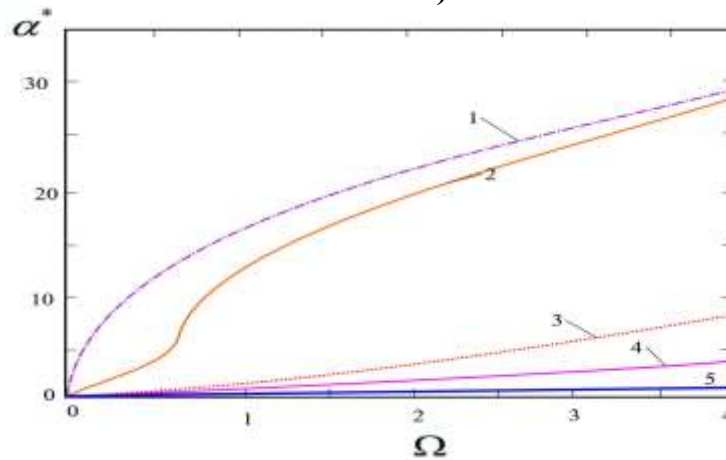


Рис. 3. Связь между волновым числом и частотой (для вязкоупругой системы) $A = 0,048$; $\beta = 0,05$; $\alpha = 0,1$; $\nu_0 = 0,33$.

На рисунке 1 изображена связь между частотой и волновым числом при кручении, 2 - действительная часть неосесимметричного дисперсионного соотношения, 3 - связь между частотой и волновым числом при продольных колебаниях, 4 - связь между частотой и волновым числом при поперечных колебаниях, 5 - мнимая часть неосесимметричного дисперсионного соотношения. Для исследуемых вязкоупругих материалов использовались оболочки из дюралюминия и акрила. Абсолютная погрешность собственных значений в расчетах составила около $14 \cdot 10^{-6}$ по сравнению с точными уравнениями. В данной главе рассмотрена классическая задача распространения волн в цилиндрической оболочке с учетом вязкоупругих свойств. Полученные результаты сравнивались с аналитически полученными

результатами. Результаты сравнения оказались разными на 10 %. Установлено, что учет параметров вязкости снижает частоту собственных колебаний на 5 %. В диссертационной работе рассматривается задача распространения волн в четырехслойном, диссипативном, однородном и неоднородном цилиндрическом теле без жидкости. В этом случае граничные условия (внутренняя и внешняя границы свободны от нагрузки, условие жесткого закрепления на границе двух слоев) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}
 r = r_0: & \quad \sigma_{rr0} = 0; \quad \sigma_{r\theta 0} = 0; \quad \sigma_{rz0} = 0; \\
 r = r_1: & \quad u_{r1} = u_{r2}; \quad u_{\theta 1} = u_{\theta 2}; \quad u_{z1} = u_{z2}; \\
 & \quad \sigma_{rr1} = \sigma_{rr2}; \quad \sigma_{r\theta 1} = \sigma_{r\theta 2}; \quad \sigma_{rz1} = \sigma_{rz2}; \\
 r = r_2: & \quad u_{r2} = u_{r3}; \quad u_{\theta 2} = u_{\theta 3}; \quad u_{z2} = u_{z3}; \\
 & \quad \sigma_{rr2} = \sigma_{rr3}; \quad \sigma_{r\theta 2} = \sigma_{r\theta 3}; \quad \sigma_{rz2} = \sigma_{rz3}; \\
 r = r_3: & \quad u_{r3} = u_{r4}; \quad u_{\theta 3} = u_{\theta 4}; \quad u_{z3} = u_{z4}; \\
 & \quad \sigma_{rr3} = \sigma_{rr4}; \quad \sigma_{r\theta 3} = \sigma_{r\theta 4}; \quad \sigma_{rz3} = \sigma_{rz4}; \\
 r = r_4: & \quad \sigma_{rr4} = 0; \quad \sigma_{r\theta 4} = 0; \quad \sigma_{rz4} = 0.
 \end{aligned} \tag{22}$$

В качестве примера рассмотрим задачу распространения волн в четырехслойной вязкоупругой цилиндрической оболочке. Для этого в качестве ядра релаксации используем трехпараметрическое слабое ядро поглощения Рижаницына Колтунова.

Таблица 1.

Изменение частоты свободных колебаний для четырехслойной цилиндрической оболочки с n

№	Действительная часть безразмерной собственной частоты						
	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5	Ω_6	
0	0.36913	0.83335	1.34362	1.75354	2.34374	3.00328	
	0.36919	0.83334	1.34362	1.75354	2.34374	3.00328	
1	0.35885	0.53632	0.86722	1.17272	1.37979	1.75152	
	0.35884	0.53632	0.86723	1.17273	1.37980	1.75153	
2	0.37309	0.61399	0.95428	1.21002	1.47866	1.75287	
	0.37308	0.61400	0.95428	1.21002	1.47867	1.75288	
3	0.44122	0.71206	1.06769	1.27295	1.61076	1.78279	
	0.44121	0.71206	1.06769	1.27295	1.61076	1.78280	
4	0.55006	0.82384	1.18781	1.35816	1.71423	1.89819	
	0.55006	0.82384	1.18781	1.35817	1.71424	1.89820	

Для всех слоев $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.05$; $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0,1$ амплитуда реологического ядра может быть разной: $A_1 = A_2 = 0,048$; $A_3 = A_4 = 0,01$. Коэффициент Пуассона $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \nu_4 = 0.25$. Численные результаты получены для четырехслойной цилиндрической оболочки в безразмерных параметрах.

Результаты представлены в таблице 1 ($\alpha = 0.25$). В этой таблице изучаются аксиально-симметричные и асимметричные колебания

вязкоупругого четырехслойного цилиндра. Расположение собственных частот зависит от модуля Юнга. В расчетах $\frac{E_{01}}{E_{04}} = 1.5$, $\frac{E_{02}}{E_{04}} = 1.01$, $\frac{E_{03}}{E_{04}} = 0.95$.

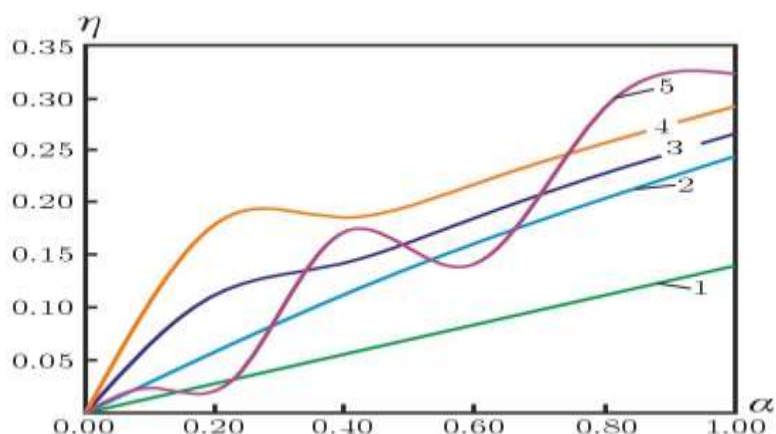


Рис. 4. Изменение коэффициента затухания декремента в зависимости от волнового числа: 1-n=0; 2-n=4; 3-n=3; 4-n=2; 5-n=1 (2-я мода)

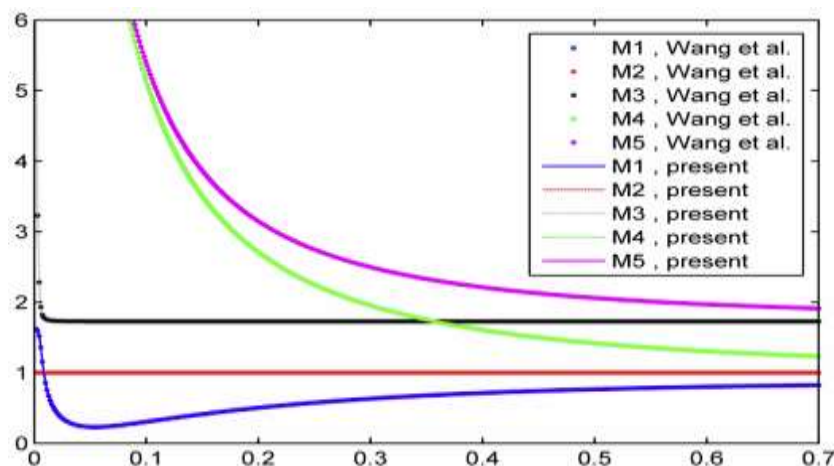


Рис. 5. Изменение фазовой скорости с волновым числом n=0 (1-5 моды)

Изменение декремента затухания в зависимости от волнового числа для различных значений n приведено на рис. 4. Видно, что с увеличением волнового числа величина декремента затухания возрастает и приближается к асимптоте. Задача распространения волны в двухслойной оболочке сравнивалась с результатами Т.Рузиева. Они совпадают с разницей в 2-3 %. Изучено изменение фазовой скорости для оболочки с трехслойным наполнителем. Изменение действительной части фазовой скорости в области длинных волн в зависимости от волнового числа показано на рис.5. На этом рисунке показано изменение пяти мод фазовой скорости в зависимости от волнового числа. Видно, что низшие моды фазовой скорости слабо зависят от волнового числа. Высокие моды уменьшаются экспоненциально и приближаются к асимптотам.

В четвертой главе диссертации **“Распространение вынужденной волны в многослойной диссипативной неоднородной цилиндрической оболочке”** решена задача динамического напряженно-деформированного состояния, вызванного нестационарной силой. При изучении динамических

процессов, возникающих под действием неустановившейся силы, при решении дифференциального уравнения движения применяется интегральное преобразование Лапласа. Тогда приведенные выше уравнения принимают следующий вид

$$\begin{aligned}
C_{11}u_n^L + c_{12}w_n^L &= P_{1n}^L(s), \\
C_{21}u_n^L + c_{22}w_n^L &= P_{2n}^L(s), \\
C_{\alpha 0}^2(1 - \Omega_p^s(s))\nabla^2\Phi^L(r, s) - s^2\Phi &= 0 \\
C_{\beta 0}^2(1 - \Omega_c^s(s))\nabla^2\Psi^L(r, s) - s^2\Psi &= 0,
\end{aligned} \tag{23}$$

В ЭТОМ

$$c_{11} = c_{10}^2[n(n+1) - (1 - \nu_0)] + s^2; c_{12} = -c_{10}^2(\nu_0 + 1);$$

$$c_{21} = -c_{10}^2(\nu_0 + 1)(n+1)n,$$

$$c_{22} = 2c_{10}^2(\nu_0 + 1) + \left(1 + \frac{s^n f_n(s)}{m\Phi_n(s)}\right)s^2.$$

Решая приведенную выше систему (19), можно найти перемещения.

$$\begin{aligned}
u_n^L &= \frac{c_{12}P_{1n}^L(s) - c_{22}P_{2n}^L(s)}{c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}}, & w_n^L &= \frac{c_{11}P_{2n}^L(s) - c_{21}P_{1n}^L(s)}{c_{11}c_{22} - c_{12}c_{21}}, \\
\Phi^L(r, s) &= \sum_{n=0}^{\infty} (A_n K_{n+\frac{1}{2}}(\alpha_s r) + B_n N_{n+\frac{1}{2}}(\alpha_s r)), \\
\Psi^L(r, s) &= \sum \left(C_n K_{n+\frac{1}{2}}(\beta_s r) + M_n N_{n+\frac{1}{2}}(\beta_s r) \right), \\
\alpha_s^2 &= \frac{s^2}{c_{\alpha 0}^2(1 - \Omega_p^s(s))}, & \beta_s^2 &= \frac{s^2}{c_{\beta 0}^2(1 - \Omega_c^s(s))}.
\end{aligned} \tag{24}$$

Последние соотношения в (23) и (24) называются $K_n(X), N_n(X)$ –модифицированной функцией Бесселя и Неймана. A_n, B_n, C_n, M_n – произвольные постоянные величины, и используются граничные условия. Подинтегральная функция вычисляется по жордановой леме.

$$\int_C f(\zeta) d\zeta = 2\pi i \sum_{n=1}^m R_n,$$

Изменение контурного напряжения во времени под действием неустойчивых сил показано на рис. 8 ($\theta = 75^\circ$). В расчетах было вычислено 35 членов ряда. Поставленные задачи вычислялись с помощью интегрального преобразования Лапласа по времени. Обратные преобразования решаются границами ($0 < t < T$).

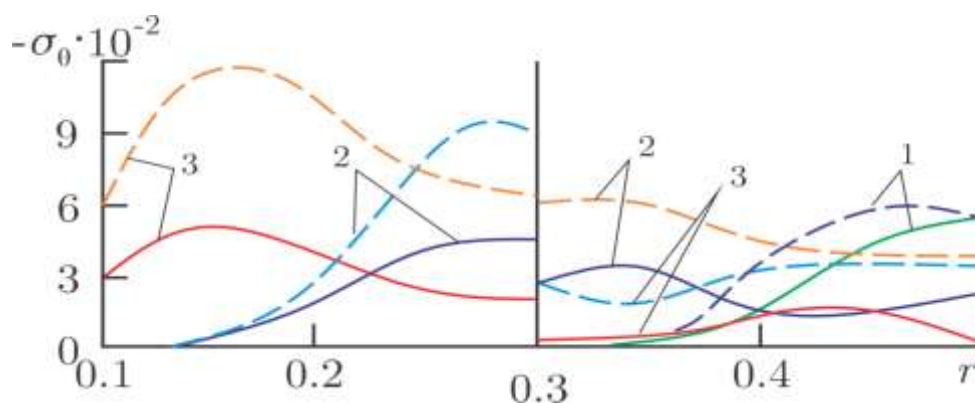


Рис. 6. Распределение контурных напряжений по сечению (ситалл-сталь)

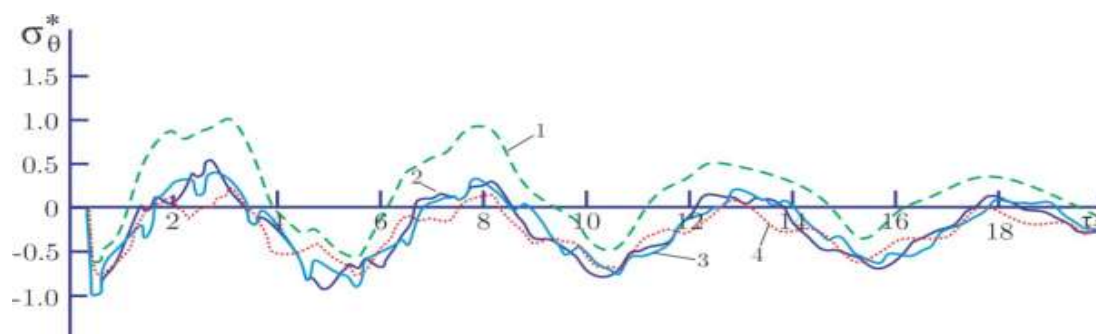


Рис. 7. Безразмерное ($\sigma_\theta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_0}$) изменение контурного напряжения со временем.

Кривые, изображенные на рисунке, были получены для следующих размеров:

1. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 1.01, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 0.75, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.01, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65;$
2. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 0.91, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 1.05, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.01, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65;$
3. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 0.5, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 0.75, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.2, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65;$
4. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 0.41, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 1.5, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.01, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65;$
5. $\frac{E_{01}}{E_{03}} = 0.35, \frac{E_{02}}{E_{03}} = 1.9, \frac{\rho_{01}}{\rho_{03}} = 1.01, \frac{\rho_{02}}{\rho_{03}} = 0.65.$

Результаты показывают, что контурные напряжения зависят от физико-механических свойств материалов. На следующем рисунке 5 показано изменение нормального смещения при приложении силы $F(t) = A \sin(\frac{\pi t}{T})[H(t) - H(t - T)]$ к цилиндрической оболочке с трехслойным наполнителем. Здесь A — амплитуда приложенной нагрузки; $H(t)$ — функция Хевисайда; T — период приложения нагрузки; t — время. Пусть амплитуда приложенной нагрузки $A = 60$ Па, период приложения нагрузки $T = 25 \cdot 10^{-3}$ с, а нагрузка действует в интервале $0 \leq t \leq 20T$.

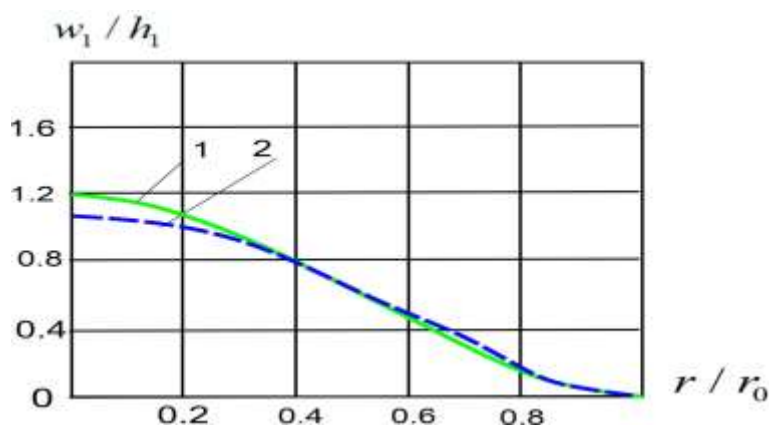


Рис. 8. Изменение смещения внутренней оболочки в зависимости от отношения радиусов 1. Наполнитель упругий; 2. Наполнитель вязкоупругий $k_1 = 0,01$

На рисунке показано изменение смещения внутренней оболочки в зависимости от соотношения радиусов: 1 – упругий наполнитель и 2 – вязкоупругий наполнитель при $k_1 = 0,01$. Смещения увеличиваются со временем, достигая максимума между 0,3 и 0,35.

На основе анализа численных результатов установлено, что зависимость амплитуды резонанса перемещений слоистых оболочек от вязкостных свойств контактирующих слоев составляет 10-15 %. Анализ полученных результатов показывает, что разработанная для многослойных оболочек методология и алгоритм могут быть применены и к оболочкам с наполнителями. При исследовании динамического состояния оболочек необходимо обращать внимание на области применения теории оболочек, то есть на низкие и высокие частоты. В противном случае это приводит к очень большим погрешностям результатов (до 20 %). Применение гипотез Кирихова-Лява и Тимошенко в диапазонах низких частот отличается до 20 %, а затем совпадает. В диссипативных неоднородных механических системах нашел отражение синергетический эффект И.И. Сафарова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методика, алгоритм и программа распространения собственных волн многослойного вязкоупругого цилиндрического волновода с учетом вязкостных свойств материалов при выполнении различных условий контакта между слоями. Разработанная методика основана на методе специальных функций математической физики, методах Мюллера, Лапласа и Гаусса, а также на потенциалах Грин-Лэмба.

2. Вязкостные свойства материалов получены с использованием интегрального соотношения Больцмана-Вольтера. В качестве ядра релаксации использовалось слабо сингулярное трехпараметрическое ядро Рыжаницына-Колтунова.

3. Разработаны постановка задачи, методика и алгоритм решения задачи распространения вынужденной волны под действием внешней нагрузки при

выполнении различных условий контакта между контактами многослойного вязкоупругого цилиндрического волновода.

4. Установлено, что если не учитывать инерцию среды (основание Винклера), значение первой частоты увеличивается до 20 %, значение второй частоты увеличивается до 5-10 %, а значение третьей частоты практически не меняется.

5. При применении гипотез Кирихгофа-Лява и Тимошенко в низкочастотных диапазонах они отличались на 20 % и затем совпадали. В диссипативных неоднородных механических системах отражается синергический эффект И.И. Сафарова.

6. Уменьшение относительной жесткости оболочки привело к уменьшению концентрации напряжений. Установлено, что концентрация максимальных напряжений в области длинных волн в скользящем контакте на 20 % больше, чем в полном контакте. В области длинных волн найдено немонотонное изменение касательного напряжения относительно волнового числа заземленном контакте.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 ON AWARDING
SCIENTIFIC DEGREES BUKHARA STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

BUKHARA STATE TECHNICAL UNIVERSITY

RUZIEVA MAVLUDA ANVAROVNA

**PROPAGATION OF SPECIFIC AND FORCED WAVES IN A MULTI-
LAYER DISSIPATIVE INHOMOGENEOUS CYLINDRICAL SHELL**

01.02.04 – Mechanics of a deformable solid

DISSERTATION ABSTRACT
for scientific degree Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences

Bukhara – 2025

The topic of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan for B2025.2.PhD/FM1310

The dissertation has been prepared at Bukhara State Technical University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the university. (www.https://bstu.uz/) and on "Ziyonet" information and educational portal (www.ziyonet.uz) placed.

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

Official Opponents: **Mavlanov Tulkin Mavlanovich**
Doctor of Technical Sciences, Professor.

Indiaminov Ravshan Shukurovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Lead organization: **Namangan State Technical University**

The defense of the thesis will take place on 28 october 2024 at 11:³⁰ o'clock at a meeting of the Scientific Council Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 at the Bukhara State Technical University at the address: 200100, Bukhara, st. K. Murtazayev, 15. Phone: (+99865) 223-78-84; fax: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz.

The dissertation can be found at the Information resource center of the Bukhara State Technical University (registered under the number № 474.). (Address: Bukhara region, 200100, Bukhara, K. Murtazaev st., 15. Phone: (+99895) 604-44-70).

Abstract of dissertation sent out on 14 oktober 2025 year

(mailing report №8 on 29 august 2025 year)



Teshaev M.Kh.

Chairman of the Scientific Council for the Award of Academic Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor (DSc)

Sabirova R.A.

Scientific Secretary of the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, PhD in Physics and Mathematics

Boltayev Z.I.

Chairman, of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, Doctor of Physics and Mathematics (DSc), Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The relevance and relevance of the topic of the dissertation. In the world, one of the leading places is occupied by the study of dynamic processes occurring under the influence of vibrations and external loads of elements of viscoelastic multilayer structures, the study of the dynamics of multilayer elements of engineering structures used in various fields of construction and technology, and the application of modern computational methods and algorithms. On a global scale, multilayer heterogeneous cylindrical shells in submarines, in some devices of aircraft, for increasing the strength of mechanical systems, the use of composite materials that operate under various dynamic (vibrational and impact) forces, taking into account energy dissipative properties, and the introduction of new methods for calculating their dynamic characteristics into practice is required.

In the world, scientific research is being conducted aimed at creating reliable calculation methods and algorithms that ensure the minimum distribution of stress concentration in the dynamic state of multilayer structures. In this regard, special attention is paid to targeted scientific research aimed at developing an effective methodology and algorithm for calculating dynamic processes in multilayer structures with different viscous properties under the influence of dynamic loads, determining the stress-strain state of elements of various types of above-ground and underground engineering structures.

In our republic, in this regard, an important place is occupied by the assessment of the resonant state of structures, taking into account viscous parameters, which allows not only to understand the essence of energy dissipation in the dynamic process for multilayer media, but also to develop methods for determining and optimizing dissipative characteristics, as well as to study the dynamic stress-strain state of structurally inhomogeneous long-layer mechanical systems. Important tasks have been defined in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan dated May 30, 2022 № UP-144 “On Measures for Further Improvement of the Seismic Safety System of the Republic of Uzbekistan.” In the implementation of these tasks, including in the calculation of stresses of materials in a dynamic state, the widespread introduction of mathematical modeling and the development of software systems taking into account the rheological properties of the materials used is of great importance.

This dissertation research, to a certain extent, serves the fulfillment of the tasks stipulated in the Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan № UP-4947 of February 7, 2017 “On the Action Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan,” № UP-5853 of October 23, 2019 “On Measures to Radically Increase the Effectiveness of the System for Prevention and Elimination of Emergency Situations,” Resolutions of the President of the Republic of Uzbekistan № PP-3190 of August 9, 2017 “On Measures for the Further Development of Scientific Research in the Field of Earthquake-Resistant Construction and Seismology of the Territory and Population of the Republic of Uzbekistan,” № PP-4708 of May 7, 2020 “On Measures to Improve the Quality of

Education and Research in the Field of Mathematics,” as well as in other regulatory legal documents adopted in this area.

Compliance of the research with the priority directions of science and technology development of the republic. This dissertation research was carried out in accordance with the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan IV. “Mathematics, Mechanics, Seismic Dynamics of Structures and Informatics” and XIV. “Seismology, Seismic Safety of Buildings and Structures and Construction.”

The object of the study is a long viscoelastic cylindrical body with two, three and four layers.

The scientific novelty of the research is as follows:

For the first time, a method and algorithm for solving the problems of propagation of natural and stimulated waves in a multilayer dissipative inhomogeneous cylindrical shell, taking into account the viscoelastic properties of materials through the Koltunov-Rzhanitsyn kernel, were developed based on the Laplace integral transform, freezing, Gaussian, and Müller methods;

It was found that the first, second, third, and fourth natural frequencies of the complex frequencies of dissipatively homogeneous and inhomogeneous cylindrical bodies with multiple (two, three, and four) layers differ by up to 5 % in their real parts and radically change in the imaginary parts;

The first mode of the phase velocity of a dissipatively inhomogeneous four-layer cylindrical shell is concave in the range of the wave number, the first and third modes of the phase velocity practically do not depend on the wave number, in the range of higher modes it depends on the wave number, and when it does not depend on the wave number, it is found from the solutions of the transcendental equation expressing the dispersion relations;

It has been established that the value of the displacement amplitude at the inner free level of the two-layer shell depends on the viscous properties of the material by 10-15 %, and the results obtained based on the Kirchhoff-Love and Timoshenko hypotheses are up to 20 % at low frequencies and 10 % at high frequencies.

Implementation of research results. Based on the results obtained on the calculation method, algorithm, and program, taking into account the scientific basis of linear free and forced oscillations of a three-layer dissipatively inhomogeneous cylindrical body:

implementation of the research results. the effect of damping the amplitude of oscillations in dissipative inhomogeneous systems was used in the implementation of the project OT-F4-01 “Development of methods and theory for studying the nonlinear dynamic stress-strain state of curvilinear sections of multilayer composite pipes flowing with a viscous fluid under the influence of temperature and dynamic loads” at the Tashkent Chemical-Technological Institute (certificate of the Tashkent Chemical-Technological Institute № 1/01-1820 dated May 25, 2025). As a result, the possibility of controlling vibrations in the resonance zone of the pipe has been created;

the methodology for solving the problem of wave propagation in a thin cylindrical shell with a long viscoelastic filler, developed in the dissertation, was used in the fundamental project RFFI-18-48-240007 “Multiversion method for increasing the information reliability of production and environmental monitoring of thermal power plants” (“Multiversionnyy metod povysheniya informatsionnoy nadejnosti proizvodstvenno-ekologicheskogo monitoringa teplovykh elektrostansiy”), carried out in 2018-2020 within the framework of the state scientific and technical program of the Fundamental Research Fund of Russia (Reference № 177-40 of the House of Science and Technology of the Krasnoyarsk Territory of the Union of Scientific and Engineering Public Associations of Russia dated July 10, 2025). As a result, the possibility of creating the theoretical foundations of production and environmental monitoring and mathematical modeling of processes for assessing the generalized quality criterion was created.

Publication of research results. A total of 15 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, including 4 articles in scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations of Doctor of Philosophy (PhD), including 2 in republican and 2 in foreign journals.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 104 pages.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. M.A.Ro'ziyeva. Elastik muhitdagi silindrik qobiqqa ko'ndalang to'lqin tarqalishi. Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti "Ilm sarchashmalari" ilmiy-nazariy, metodik jurnal. 7-son. Urganch–2025y. 28-32. b(01.00.00, №12).

2. З.И.Болтаев, С.Ж.Собиров, М.А.Рўзиева. Не осесимметричные задачи стационарного напряжённого состояния соосных вязкоупругих оболочках с жидкостью между ними. Вухоро Davlat universiteti ilmiy axboroti. Вухоро-2024 №3. 3-10 б. (01.00.00, №3).

3. 1. Z.I. Boltayev., S.J. Sobirov., T.R. Ruziyev., M.A. Ro'ziyeva. Распространение сдвиговых волн в вязкоупругих двухслойных средах. European Journal of Interdisciplinary Research and Development. – 2023. – Vol.№16. –P.332-339 June (2023) www. ejird journalspark.org. ISSN(E):2720-5746.(IF=7.985)

4. F.B. Jalolov., S.J. Sobirov., M. A. Ro'ziyeva. Free vibrations of a mechanical system formed from masses suspended on circular thin alloy-elastic plates. International Scientific Journal Theoretical & Applied Science. e-ISSN: 2409-0085 (online) Year:2025 Issue:04 Volume:144. –P. 4-8 <https://T-Science.org>(IF=0,35)

II bo'lim (II часть; part II)

5. Z.I.Boltayev, A.X.Khojiyev, M.A.Ro'ziyeva, A.A.Jumayeva. Diffraction of a Longitudinal Wave by a Cylindrical Body with a Solid Homogeneous Fluid in a Solid-Elastic Medium. 1st EduVision: Global Innovations in Learning and Teaching Conference February 12, 2025.

6. Z.I.Boltayev, R.A.Sabirova, S.J.Sobirov, M.A.Ro'ziyeva. Influence of constant load speed on the response of a viscoelastic multilayer plate lying on a deformable base. AIP Conference Proceedings 3268, 030027(2025) <https://doi.org/10.1063/5.0260220>

7. M.Teshayev, M.Axmedov, M.A.Ro'ziyeva, R.Sobirova, Sh.Axmedov. Propagation of purely shear viscose-elastic waves with allowance for the of particle rotation in a flat layer. E3S Web of Conferences 417, 06009 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341706009> GEOTECH-2023

8. З.И.Болтаев, Т.Р.Рузиев, Р.А.Собирова, М.А.Рўзиева. Распространение собственных волн в линейных упругих телах с начальным напряжением. Механика va matematikaning amaliy muammolari Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi 17-18 may, Toshkent 2024 yil

9. M.A.Ro'ziyeva. О воздействии дилатационных волн на динамические напряжения подземного трубопровода с жидкостью. Механика va

matematikaning amaliy muammolari Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi 17-18 may, Toshkent 2024 yil

10. З.И.Болтаев, С.Ж.Собиров, Р.А.Собирова, М.А.Рўзиева. Теоретическое исследование скорости поверхностных волн релая в изотропных телах с начальными напряжениями. Mexanika va matematikaning amaliy muammolari Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi 17-18 may, Toshkent 2024 yil

11. И.М.Каримов, З.И.Болтаев, С.Ж.Собиров, М.А.Рўзиева. Колебания вязкоупругой тороидальной оболочки с протекающей жидкостью. Международная научная конференция Актуальные проблемы современной геометрии и топологии 27-29 октября 2024 года г.Ташкент

12. Б.С.Рахмонов, У.И.Сафаров, Н.У.Кулдашов, М.А.Рўзиева, М.М.Тоиров. Сейсмический эффект промышленных взрывов проведенных джумуртауском и каратауском каменных карьерах. Международная научная и научно-техническая конференция на тему «Инновации в строительстве, сейсмическая безопасность зданий и сооружений» Наманган 27-28 ноябрь, 2024 йил

13. З.И.Болтаев, Г.Т.Мирзоева, М.А.Рўзиева, С.Ж.Собиров, Н.Ш.Эргашева. Собственные колебания ребристой усеченной конической оболочки. Международная научная и научно-техническая конференция на тему «Эффективное использование водных ресурсов в условиях глобального изменения климата» 29-30-апреля 2025 г

14. И.И.Сафаров, З.Т.Исмоилова, У.И.Сафаров, М.А.Рўзиева. Дифракция гармонических волн в многониточном трубопроводе с жидкостью. Интеграция науки, образования и производства в механике: проблемы, решения и перспективы международная научно-техническая конференция 1-3 мая 2025 года, г. Карши

15. И.И.Сафаров, С.Ж.Собиров, Б.Ш.Зарипов, М.А.Рўзиева. Колебания сферической неоднородности в вязкоупругой среде Интеграция науки, образования и производства в механике: проблемы, решения и перспективы международная научно-техническая конференция 1-3 мая 2025 года, г. Карши

Avtoreferat “Durdona” nashriyotida tahrirdan o‘tkazildi
hamda o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi.

Bosishga ruxsat etildi: 29.09.2025 Bichimi: 60x84 1/16.
“Times New Roman” garniturada raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i: 3,25. Adadi 100. Buyurtma № 291.
Guvohnoma AI №178.08.12.2010

“Sadridin Salim Buxoriy” MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Buxoro shahri, M. Iqbol ko‘chasi, 11-uy. Tel.: 65 221-26-45

