

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

BUXORO DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

NARZULLOYEV MUXAMMAD AZAMATOVICH

**QOVUSHQOQ-ELASTIK TO‘LDIRUVCHILI UCH QATLAMLI
PLASTINKALARNING TEBRANISHLARI VA TO‘LQIN TARQALISHI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (Doctor of philosophy) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Buxoro – 2025

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati
mundarijasi**

**Оглавние автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on technical sciences**

Narzulloev Muxammad Azamatovich

Qovushqoq-elastik to'ldiruvchili uch qatlamli plastinkalarning tebranishlari va to'liqin tarqalishi 3

Нарзуллоев Мухаммад Азаматович

Колебания и распространение волн в трехслойных пластинах с вязкоупругим наполнителем 21

Narzulloev Mukhammad Azamatovich

Vibration and wave propagation of three-layer plates with visco-elastic filler 41

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works 45

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

BUXORO DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

NARZULLOYEV MUXAMMAD AZAMATOVICH

**QOVUSHQOQ-ELASTIK TO‘LDIRUVCHILI UCH QATLAMLI
PLASTINKALARNING TEBRANISHLARI VA TO‘LQIN TARQALISHI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (Doctor of philosophy) dissertasiyasi
AVTOREFERATI**

Buxoro – 2025

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertasiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestasiya komissiyasida B2025.4.PhD/T1073 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertasiya Buxoro Davlat universitetida bajarilgan.

Dissertasiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) universitet veb-saytida ([www.https://bstu.uz/](https://bstu.uz/)) va "Ziyonet" Axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Teshaev Muhsin Xudoyberdiyevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Ismayilov Kubaymurad –
texnika fanlari doktori, professor.

Yuldashev Sharofiddin Sayfiddinovich
texnika fanlari doktori, professor;

Yetakchi tashkilot:

Toshkent davlat taransport universiteti

Dissertasiya himoyasi Buxoro davlat texnika universiteti huzuridagi PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil 11-noyabr soat 10:00 dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 200100, Buxoro shahar, Q.Murtazoyev ko'chasi, 15 uy. 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 (№ 480, raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: (200100, Buxoro shahri, Q. Murtazoyev ko'chasi, 15 uy. Tel.: (+99895) 604-44-70).

Dissertasiya avtoreferati 2025 yil 25- oktabr kuni tarqatildi.
(2025 yil «13» sentabrdagi №1 raqamli reestr bayonnomasi).



I.I. Safarov

Ilmiy darajalar beruvchi bir martalik ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d, prof

R.A. Sabirova

Ilmiy darajalar beruvchi bir martalik ilmiy kengash ilmiy kotibi, f.-m.f.b.f.d. (PhD)

Z.I. Boltayev

Ilmiy darajalar beruvchi bir martalik ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d. (DSc), prof

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertasiyasi annotasiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda texnika va qurilishda uchraydigan juda ko'p konstruksiya elementlari to'ldiruvchili uch qatlamli plastinkalardan tashkil topgan bo'lib, bunday uch qatlamli plastinkalar turli deformatsiyalanuvchan element yordamida boshqa detallar bilan o'zaro ta'sirlashganda ularning dinamik holatini tadqiq etish muhim masalalardan biri hisoblanadi. Shu jihatdan, uch qatlamli plastinkasimon konstruksiyalarda, asos bilan o'zaro ta'sirda bo'lgan holda, to'liq tarqalishi masalalarini o'rganish, zamonaviy qurilish inshootlari, samolyotsozlik, kemasozlik va mashinasozlik qurilmalarida har qanday dinamik ta'sirlar natijasida vujudga keladigan rezonans holatlarini nihoyatda aniq tasavvur qilishga imkon beradi. Bu borada ko'pgina xorijiy davlatlarda, jumladan AQSh, Kanada, Rossiya va boshqa rivojlangan davlatlarda harakatlanuvchi transportlardagi tebranish va shovqinga qarshi kurashish muammolarini yechish uchun uch qatlamli plastinkalardan foydalanish samarali ekanligiga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda ko'p qatlamli plastinkada xos to'liqlar tarqalishi va tashqi yuklanishi natijasida hosil bo'ladigan dinamik jarayonlar holatini o'rganishga hamda konstruksiyalarni takomillashtirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda, jumladan, samolyot va harakatlanuvchi transport vositalarining ko'p qismlari ikki va uch qatlamli konstruksiyalardan tashkil topgan bo'lib, bu konstruksiyalarning tashqi kuchlar ta'siridagi dinamik holatini baholashga yo'naltirilgan maqsadli ilmiy izlanishlar bo'yicha ilmiy-tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu borada, konstruksiyalar asosan to'ldiruvchili uch qatlamli plastinka sifatida modellashtirilgan bo'lib, uch qatlamli plastinka to'ldiruvchisi bikirligi va qovushqoqlik xususiyatlarini hisobga olish bilan ularning dinamik holatini xarakterlovchi parametrlar (to'liq soni, chastotasi, faza tezligi va tebranishlar formasi) ni aniqlash usullarini ishlab chiqish zarur hisoblanadi. Shu bilan birga uch qatlamli plastinkada hosil bo'ladigan dinamik zo'riqishlar va deformatsiyalarni kamaytirish usullarini takomillashtirish muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

Respublikamizda hozirgi kunda uch qatlamli plastinkalarda hosil bo'ladigan salbiy holatlarni kamaytirishga va plastinka qatlamlari bilan o'zaro ta'sirlashuvchi qatlam bikirligini tanlash hisobiga konstruksiyaning mustahkamligini oshirish bo'yicha keng qamrovli chora tadbirlar amalga oshirilmoqda. 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 Farmonida, jumladan, "Matematika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy-tadqiqotlarni rivojlantirish chora tadbirlari to'g'risida" PQ-4708-sonli 2020 yil 7 maydagi Prezident Qarorlarida vazifalar belgilangan. Shu jihatdan, deformatsiyalanuvchi muhit bilan o'zaro ta'sirda bo'lgan uch qatlamli plastinkalarning tebranishlari masalalarida rezonans sohasidagi titrashlarni bartaraf etish muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023 yil 16-maydagi PQ-158-sonli "O'zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta'minlash

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

tizimini tubdan takomillashtirish chora tadbirlari to‘g‘risida”gi, “Matematika sohasidagi ta‘lim sifatini oshirish” va 2024-yil 17-apreldagi PQ-161-sonli “Bino va inshootlarning zilzilaga bardoshlilikini oshirish hamda seysmik xavfni monitoring qilish faoliyatini takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida” gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va innovatsion texnologiyalar rivojlanishining IV. “Matematika, mexanika, inshootlar seysmodinamikasi va informatika” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi.

Uch qatlamli plastinkalarda to‘lqin tarqalishi muammosi bilan bog‘liq nazariy hamda amaliy ilmiy tadqiqot ishlari xorijiy mamlakatlarning taniqli olimlari A.A. Ilyushin, Uayt, I.D. Grudev, A.G. Gorshkov, B.Ye Pobedrya, A.N. Guz, I.Ye. Troyanovskiy, R. Mitra, A.S. Volmir, F.G. Abdula-Zade, R. Aleksander, A.A. Vasin, M.V. Vasina, V.I. Jeltkov, Chan Txan Xay, Ye.A. Devyanin, A.B. Lenskiy, Yu.I. Novichkov, K. Kremer, A.N. Laputin, A.N. Antonov, Ya.A. Lugovaya, Li Xiaowei, C. Haut Roger, J. Altiero Nicholas, G. Vanneuville, M. Bourges, J.M. Garcier, M. Guillot, G. Poumarat va boshqa olimlar ilmiy izlanishlar olib borishgan.

Respublikamizda bu muammo bo‘yicha X.A. Raxmatulin, M.T. O‘razboev, T.R. Rashidov, Y.N. Muborakov, T.Sh. Shirinkulov, V.K. Kabulov, B.M. Mardonov, K.S. Sulonov, Sh.M. Mamatqulov, M.M. Mirsaidov, I.K. Mirzaev, F.B. Badalov, G.X. Xojmetov, A.A. Ishanxodjaev, T.M. Mavlonov, A. Abdusattorov, I.I. Safarov, M.X. Teshae, Sh.S. Yuldashev, Z.I. Boltaev va boshqa olimlar tomonidan izlanishlar olib borilgan va ko‘zlangan natijalarga erishilgan. Ular deformatsiyalanuvchan muhit bilan aloqada bo‘lgan uch qatlamli plastinkada turg‘un va turg‘un bo‘lmagan yuklanishlar masalalarini materiallarning reologik xususiyatlarini hisobga olib, kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini o‘rganish usullarini rivojlantirishgan.

Shu bilan birga, V.V. Bolotin, Yu.N. Novichkov “ko‘p qatlamli mexanik qurilmalar” deb nomlangan asarda ko‘p qatlamli plastinkaning deformatsiyalanuvchi muhit bilan o‘zaro ta‘sirida bo‘lmagan va qovushqoqlikni hisobga olinmagan holda statika va dinamika masalalarini o‘rganganlar. A.G. Gorshkov, E.I. Starovoytov, A.V. Yarovaya “Qatlamli mexanik qurilmalarning qovushqoq-plastik elementlari” deb nomlangan asarda ko‘p qatlamli plastinkalarning xos va majburiy tebranishlari masalalarini yechishda maxsus funksiyalar yordamida asimptotik yechimlar olishgan. Ular tomonidan olingan chastotalar haqiqiy sonlar bo‘lib, hisoblashlarda asosan asimptotik formulalardan foydalangan.

Tavsiya etilayotgan dissertatsiya ishida yuqorida keltirilgan kamchiliklarni bartaraf etishga harakat qilingan. Dissertatsiya ishida deformatsiyalanuvchan muhit bilan o‘zaro ta‘sirida bo‘lgan uch qatlamli plastinkalarning harakat tenglamalarini materialning qovushqoqlik xususiyatlarini hisobga olib chiqarilgan hamda turli chegaraviy shartlar qo‘yilganda masalalar yechish uchun algoritm va dastur yaratish bo‘yicha izlanishlar olib borilgan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Buxoro davlat texnika universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining 2017-2025 yillarga mo'ljallangan M.01.2017-raqamli "Mexanika va matematik fizika tenglamalarining tadbiqlari" mavzusidagi ilmiy-tadqiqot yo'nalishi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi to'ldiruvchili uch qatlamli plastinkaning qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga olib, xos va majburiy to'lqinlarning tarqalishi masalalarini o'rganish (kompleks chastota, faza tezligi, to'lqin soni va tebranish formasini aniqlash, ko'chish amplituda-chastotasini xarakteristikasini qurish) uchun uslubiyot va algoritm ishlab chiqish hamda sonli natijalar olib, uni tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

to'ldiruvchili uch qatlamli plastinkada to'lqin tarqalishi masalalarini materiallarning qovushqoq-elastiklik xususiyatlarini hisobga olgan holda matematik qo'yilishi, yechish uslubiyoti va algoritmini ishlab chiqish;

deformatsiyalanuvchi muhit bilan o'zaro ta'sirda bo'lgan to'ldiruvchili uch qatlamli plastinkada xos to'lqin tarqalishi masalalarini materiallarning qovushqoq-elastiklik xususiyatlarini hisobga olgan holda matematik qo'yilishi, yechish uslubiyoti va algoritmini ishlab chiqish;

to'ldiruvchili uch qatlamli plastinkaning kompleks chastotalarini to'lqin soniga va to'ldiruvchi bikrligiga bog'liq o'zgarishiga solishtirma baho berish;

to'ldiruvchili uch qatlamli qovushqoq-elastik plastinkada majburiy to'lqin tarqalganda muhit ko'chishlari va kuchlanishlari amplitudalarini to'ldiruvchi bikrligi o'zgarishiga bog'liq tadqiq qilish va mavjud tajriba natijalari bilan solishtirish.

Tadqiqotning obyekti sifatida qovushqoq-elastik xususiyatlarga ega bo'lgan to'ldiruvchili uch qatlamli plastinka olingan.

Tadqiqotning predmetini qovushqoq-elastik to'ldiruvchili uch qatlamli plastinkada to'lqin tarqalishini o'rganish uchun ishlab chiqilgan uslubiyot va algoritmlar tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida qo'yilgan masalalarni yechish uchun o'zgaruvchilarni ajratish, chekli elementlar usuli, Gauss va Myuller usullaridan hamda maxsus funksiyalardan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

uch qatlamli dissipativ bir jinsli bo'lmagan plastinkalarning tebranishlari va to'lqin tarqalishi masalalarini yechishda materialning relaksatsiya jarayonlarini hisobga oluvchi Bolsman-Voltera integral munosabatlarida Rjanitsin-Koltunov yadrosidan foydalanish metodikasi va algoritmi ishlab chiqilgan;

ilk marta uch qatlamli qovushqoq-elastik (dissipativ bir jinsli va bir jinsli bo'lmagan) plastinkalarning so'nuvchi tebranishlari va xos to'lqin tarqalishini to'lqin uzunligi, kompleks to'lqin soni va chastotasiga bog'liqligi kompleks argumentli trigonometrik va transendent funksiyalar orqali ifodalanuvchi dispersion tenglamasi olingan;

uch qatlamli dissipativ bir jinsli va bir jinsli bo'lmagan plastinkalarda tarqaladigan xos to'lqin uzunligi so'nish koeffitsenti birinchi, ikkinchi va uchinchi

xos chastotalarning mavhum qismlariga nomanoton bog‘liqligi sonli natijalar asosida topilgan;

uch qatlamli qovushqoq-elastik plastinkada majburiy to‘lqin tarqalganda muhit ko‘chishlari va kuchlanishlari amplitudalarining to‘ldiruvchi bikirligiga bog‘liq o‘zgarishida, dissipativ bir jinsli bo‘lmagan holatda, energiya dissipatsiyasining past chastotali sohollarda intinsiv bo‘lishi, yuqori chastotalarda esa intensivlikning pasayishi samarasi topilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

qovushqoq-elastik to‘ldiruvchili uch qatlamli plastinkada to‘lqin tarqalishi natijasida hosil bo‘ladigan dispersion munosabatlarni va dekrement so‘nish koefitsientlarini topish, hamda ularning rezonans hodisasiga to‘ldiruvchi bikrligi ta‘sirini hisobga olib, metodika ishlab chiqilgan;

birjinslimas qovushqoq-elastik mexanik sistemalarda energiya dissipasiyasining intensiv bo‘lish nuqtalari va bu nuqtalarda global so‘nish koefitsienti (GSK) maksimumga, global rezonans amplituda (GRA) esa minumumga ega bo‘lishi topilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi chegaraviy masalaning korrekt qo‘yilishi, keltirib chiqarilgan matematik ifodalarning qat‘iyligiga, asoslangan yechish usullaridan foydalanish va yechimlarning aniqligini baholashlar, hamda boshqa matematik qo‘yilgan masalalarning yechimlari bilan taqqoslashlar orqali izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati, deformatsiyalanuvchan qovushqoq-elastik to‘ldiruvchili uch qatlamli plastinkada to‘lqin tarqalishini tadqiq qilishda ishlab chiqilgan metodika va algoritm bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati-ishlab chiqilgan metodika, algoritm va dastur yo‘l qurilishida qatlamlarning rezonans hodisalarini bartaraf etish uchun parametrlarning optimal qiymatlarini topishga xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Tadqiqotdagi to‘ldiruvchili uch qatlamli plastinkada to‘lqin tarqalishi va tebranishlari masalalarining dinamik kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini hisoblash usullari va algoritmi bo‘yicha olingan natijalar asosida:

dissertatsiyada ishlab chiqilgan qovushqoq-elastik to‘ldiruvchili uch qatlamli plastinkalarda xos to‘lqin tarqalishini ifodalovchi dispersion munosabatlardan Toshkent kimyo-texnologiya instituti Davlat ilmiy-texnika dasturi doirasida bajarilgan 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 loyihada foydalanilgan (Toshkent kimyo-texnologiya institutining 2025-yil 8-iyuldagi 1/01-2410-sonli ma‘lumotnomasi) foydalanilgan. Natijada, dinamik yuklanishlar ta‘siridagi qovushqoq suyuqlik oquvchi ko‘p qatlamli kompozit quvurlarda energiyani boshqarish imkoniyati yaratilgan;

mexanik sistemaning tashqi kuchlar ta‘siridagi vujudga keladigan ko‘chishlari va kuchlanishlari rezonans amplitudalarini kamaytirish uslubidan “Amu-Buxoro mashina kanlidan foydalanish boshqarmasi” tashkilotida mexanizmlarning rezonans ko‘chishlari amplitudasini kamaytirishda foydalanilgan (O‘zbekiston

Respublikasi suv xo‘jaligi vazirligining 2025-yil 30-iyul 04/19 № 4214-son ma‘lumotnomasi). Natijada, 24 NDS (D6300-80) rusumli nasosning rezonans amplitudasini 27% gacha kamaytirishga erishilgan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 20 ta ilmiy maqola 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 nashrlarda chop qilingan.

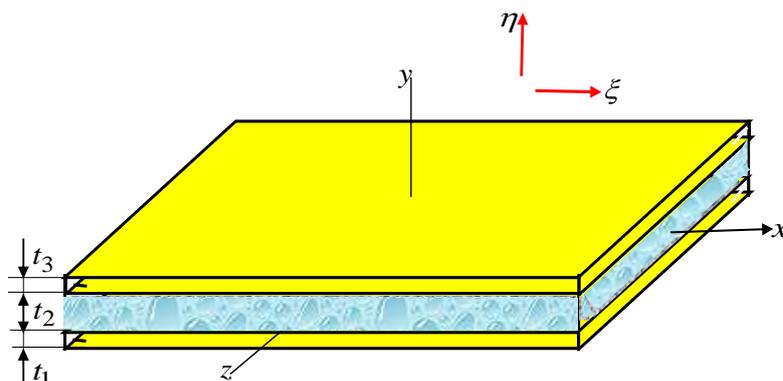
Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to‘rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 105 betni tashkil etgan.

DISSERTASIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida o‘tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, obykti va predmeti tavsiflangan, respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchligi 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 **“To‘ldiruvchili uch qatlamli qovushqoq-elastik plastinkalarda to‘lqin tarqalishiga bag‘ishlangan adabiyotlar tahlili”** deb nomlangan birinchi bobida qovushqoq-elastik ko‘p qatlamli plastinkada xos to‘lqinlar tarqalishi va tashqi yuklanishi natijasida hosil bo‘ladigan dinamik jarayonlar holatini o‘rganishga bag‘ishlangan adabiyotlar qisqacha tahlil qilingan. Adabiyotlar tahlili asosida xulosalar qilingan. To‘lqin dinamikasining qo‘llanilayotgan usullari va masalalari asosan dissipativ bir jinsli va bir jinsli bo‘lmagan, ya‘ni qovushqoq-elastik ko‘p qatlamli plastinkalar uchun o‘rganilgan. Tahlil natijalari shuni ko‘rsatadiki, garmonik to‘lqinlar plastinkasimon qatlamli inshootlarga ta‘sir qilganda hosil bo‘ladigan dinamik kuchlanganlik-deformasiyalanganlik holati tarqaladigan to‘lqin uzunligiga bog‘liq ko‘rsatilgan. Bir qator hollarda muhit bilan bog‘lanishdagi inshootlarda garmonik to‘lqin ta‘sirlarida hosil bo‘ladigan rezonans holatlarni hisoblashda muhitning qovushqoq-elastiklik xususiyatlarini va dissipativ bir jinsli bo‘lmashlik xususiyatlarini hisobga olmaslik katta xatoliklarga olib kelishi mumkinligi ko‘rsatib berilgan.

Dissertatsiyaning **“To‘ldiruvchili uch qatlamli uzun plastinkada to‘lqin tarqalishi masalasining qo‘yilishi, yechish metodikasi va algoritmi”** deb nomlangan ikkinchi bobida uzun to‘ldiruvchili uch qatlamli plastinkada to‘lqin tarqalishi masalasining qo‘yilishi, yechish uslubiyoti va algoritmi keltirilgan. Uch qatlamli to‘ldiruvchili plastinka dissipativ bir jinsli va bir jinsli bo‘lmagan konstruktsiya sifatida olinib, to‘lqin taqalishi masalasi o‘rganilgan.



1-rasm. Uch qatlamli plastinkani hisob sxemasi

Faraz qilaylik, Dekart koordinatalar sistemasida (1-rasmda) to'ldiruvchili uch qatlamli qurilma berilgan bo'lsin. Uch qatlamli qurilmadan ajratib olingan elementar parallelepipedning dinamik harakatini ifodalovchi tenglamasi vektor ko'rinishda quyidagicha bo'ladi:

$$(\tilde{\lambda}_k + 2\tilde{\mu}_k) \text{grad div} \vec{u}_k - \tilde{\mu}_k \text{rot rot} \vec{u}_k + \vec{b}_k = \rho_k \frac{\partial^2 \vec{u}_k}{\partial t^2}. \quad (1):$$

Bu yerda, $\tilde{\lambda}_k$ va $\tilde{\mu}_k$ ($k = 1, 2, 3$ -qatlam parametrlariga mos keladi) operatorli elastiklik moduli, quyidagicha bo'ladi:

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_k f(t) &= \lambda_{0k} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\lambda}^{(k)}(t - \tau) f(\tau) d\tau \right], \\ \tilde{\mu}_k f(t) &= \mu_{0k} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\mu}^{(k)}(t - \tau) f(\tau) d\tau \right]; \end{aligned} \quad (2):$$

\vec{b}_k - hajmiy kuch ($b_k = 0$); $f(t)$ - ixtiyoriy funksiya; ρ_k - material zichligi, $R_{\mu}^{(k)}(t - \tau)$ va $R_{\lambda}^{(k)}(t - \tau)$ - relaksasiya yadrosi, λ_{0k}, μ_{0k} - materialning oniy elastiklik modullari, \vec{u}_j - ko'chish vektori.

Agar to'ldiruvchili uch qatlamli plastinkalardan tashkil topgan konstruksiya olinsa, u holda qatlamlar orasida qattiq mahkamlanganlik sharti qo'yiladi:

$$\begin{aligned} z = h_k; \sigma_{ZZK} = \sigma_{ZZ(\kappa+1)}; \sigma_{ZYK} = \sigma_{ZY(\kappa+1)}; \sigma_{XYK} = \sigma_{XY(\kappa+1)}; \\ u_k = u_{\kappa+1}; \vartheta_k = \vartheta_{\kappa+1}; w_k = w_{\kappa+1}. \end{aligned} \quad (3):$$

Agar qatlamlar orasida sirpanuvchanlik sharti (qatlamlar orasida qarshilik bo'lmasa) qo'yilsa, u holda:

$$\begin{aligned} r = a_k; \sigma_{ZZK} = \sigma_{ZZ(\kappa+1)}; \sigma_{ZYK} = \sigma_{ZYK} = 0; \\ \sigma_{XY(\kappa+1)} = \sigma_{XY(\kappa+1)} = 0; w_k = w_{\kappa+1}. \end{aligned} \quad (4):$$

Qatlamlar orasida qarshilik hisobga olinsa, u holda:

$$\begin{aligned} z = h_k; \sigma_{ZZK} = \sigma_{ZZ(\kappa+1)}; \sigma_{ZYK} = \sigma_{ZXK} = k_z \sigma_{ZZK}; \\ \sigma_{ZY(\kappa+1)} = \sigma_{ZX(\kappa+1)} = k_z \sigma_{ZZ(\kappa+1)}; w_k = w_{\kappa+1}. \end{aligned}$$

Plastinkaning erkin sathida kuchlanishdardan ozod bo'lish sharti qo'yiladi:

$$r = a_k; \sigma_{r r N} = 0; \sigma_{r \theta N} = 0; \sigma_{r z N} = 0. \quad (5):$$

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

$$z = h_k; \sigma_{ZZK} = \sigma_{ZZ(\kappa+1)}; \sigma_{ZXK} = \sigma_{ZX(\kappa+1)}; \quad (6):$$

$$\begin{aligned}\sigma_{zzk} &= \bar{k}_z(u_{zk} - u_{z(k+1)}); \\ \sigma_{zxk} &= \bar{k}_x(u_{xk} - u_{x(k+1)}).\end{aligned}$$

Plastinkaning chegaralarida qatiq mahkamlanganlik shartini qo'yish mumkin. Buning uchun:

$$u_k = 0; \quad v_k = 0; \quad w_k = 0. \quad (7):$$

To'ldiruvchili plastinkaning $x = 0$ dagi uning tashqi sirtlariga perpendikulyar yo'nalishidagi ko'chishlari chegaralangan bo'lsin, u holda:

$$\sigma_{rr1} = 0; \quad u_{y1} = 0; \quad \sigma_{xy1} = 0. \quad (8):$$

Agar inshootdagi radial koordinata chekchizlika intilsa, u holda bo'ylama va ko'ndalang to'lqin potentsiallari Zommerfeldning yutilish shartini qanoatlantiradi. Chegaraviy va kontakt shartlaridan tashqari boshlangich shartlar ham qo'yiladi:

$$\begin{aligned}u_{xk}|_{t=0} = 0, \quad u_{yk}|_{t=0} = 0, \quad u_{zk}|_{t=0} = 0, \\ \frac{\partial u_{xk}}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u_{yk}}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u_{zk}}{\partial t}|_{t=0} = 0.\end{aligned} \quad (9):$$

Bu yerda, $u_{rj}, u_{\theta j}, u_{zj}$ - ko'chish vektorining komponentlari.

Qatlamlarning ko'chishi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

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

Bu ifodaning Dekart koordinatalar sistemasidagi ko'rinishi quyidagicha bo'ladi:

$$\begin{aligned}u_{xk} &= \frac{\partial \phi_k}{\partial x} + \frac{\partial \psi_{zk}}{\partial y} - \frac{\partial \psi_{yk}}{\partial z}, \\ u_{yk} &= \frac{\partial \phi_k}{\partial y} + \frac{\partial \psi_{xk}}{\partial z} - \frac{\partial \psi_{zk}}{\partial x}, \\ u_{zk} &= \frac{\partial \phi_k}{\partial z} + \frac{\partial \psi_{yk}}{\partial x} - \frac{\partial \psi_{xk}}{\partial y}.\end{aligned} \quad (10):$$

Bu yerda, ϕ_k -bo'ylama to'lqin potentsiali, $\vec{\psi}_k(\psi_{xk}, \psi_{yk}, \psi_{zk})$ -ko'ndalang to'lqin potentsiali. Agar (10) ifodani (1) ga qo'ysak, u holda quyidagi ko'rinishdagi xususiy hosilali kompleks koeffitsiyentli differensial tenglamalarni olamiz:

$$\begin{aligned}(1 - i\Gamma_{\lambda\mu k})\nabla^2\phi_k &= \frac{1}{C_{p0k}^2} \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial t^2}, \\ (1 - i\Gamma_{\mu k})\nabla^2\vec{\psi}_k &= \frac{1}{C_{s0k}^2} \frac{\partial^2 \vec{\psi}_k}{\partial t^2}.\end{aligned} \quad (11):$$

Bu yerda, ∇^2 - Laplas operatori, $C_{p0k}^2 = (\lambda_{0k} + 2\mu_{0k})/\rho_k$, $C_{s0k}^2 = \mu_{0k}/\rho_k$ - mos ravishda bo'ylama va ko'ndalang to'lqin tezliklari,

$$\Gamma_{\mu k} = -i\Gamma_{\mu k}^{(c)}(\omega_R) + \Gamma_{\mu k}^{(s)}(\omega_R), \quad \Gamma_{\lambda\mu k} = -i\Gamma_{\lambda\mu k}^{(c)}(\omega_R) + \Gamma_{\lambda\mu k}^{(s)}(\omega_R).$$

Yuqoridagi (10) ifodalardan foydalanib quyidagi ko'rinishdagi kuchlanishlarni olamiz:

$$\sigma_{yk} = -\omega^2\phi + 2\left(-\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_{xk}}{\partial y\partial z} - \frac{\partial^2 \psi_{zk}}{\partial x\partial y}\right), \quad (12):$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{zk} &= -\omega^2\varphi + 2\left(-\frac{\partial^2\varphi_k}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\varphi_k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi_{yk}}{\partial x\partial z} - \frac{\partial^2\psi_{xk}}{\partial x\partial z}\right), \\
\sigma_{xyk} &= 2\frac{\partial^2\varphi_k}{\partial x\partial y} + \frac{\partial^2\psi_{zk}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2\psi_{zk}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi_{xk}}{\partial x\partial z} - \frac{\partial^2\psi_{yk}}{\partial y\partial z}, \\
\sigma_{xz k} &= 2\frac{\partial^2\varphi_k}{\partial x\partial z} + \frac{\partial^2\psi_{yk}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\psi_{yk}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2\psi_{zk}}{\partial y\partial z} - \frac{\partial^2\psi_{xk}}{\partial x\partial y}, \\
\sigma_{yzk} &= 2\frac{\partial^2\varphi_k}{\partial y\partial z} + \frac{\partial^2\psi_{xk}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2\psi_{xk}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi_{yk}}{\partial x\partial y} - \frac{\partial^2\psi_{zk}}{\partial x\partial z}.
\end{aligned}$$

(2.13) ni $x \rightarrow \infty$ da to'liqlar so'nuvchi bo'ladi deb, yechimni quyidagi ko'rinishda izlaymiz:

$$\begin{aligned}
\varphi_k &= C_{1k}e^{-r_{1k}x}e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
\vec{\psi}_k &= \vec{C}_k e^{-r_{2k}x}e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))},
\end{aligned} \tag{13}$$

bu yerda, C_{1k} va $\vec{C}_k = \{C_{3k}, C_{4k}, C_{2k}\}^T$ -ixtiyoriy o'zgarmlar, $\omega = \omega_R + i\omega_I$ -kompleks chastota, γ, s -to'liqin sonlari, mos ravishda y va z o'qlari bo'yicha.

Agar (13) ni to'liqin tenglamasi (11) ga qo'yilsa, quyidagi r_{1k}, r_{2k} va γ, s, ω kataliklar orasidagi munosabatlarni olamiz:

$$\begin{aligned}
r_{1k} &= \sqrt{\gamma^2 + s^2 - \bar{k}^2\omega^2}, \\
r_{2k} &= \sqrt{\gamma^2 + s^2 - \omega^2}, \\
k &= \sqrt{(1 - 2\nu)/2(1 - \nu)}.
\end{aligned} \tag{14}$$

$\bar{k}^2 = k^2\Gamma_k$ parametr $k = 0$ dan boshlab o'zgaradi. Agar $\nu = 0.5$ bo'lsa, u holda $k^2 = 0.5$ bo'ladi. Agar $x \rightarrow \infty$ bo'lsa, to'liqinning so'nish sharti $\gamma^2 + s^2 > \omega^2$ bo'ladi. Agar olingan (13) yechimni e'tiborga olib, (11) va (12) ga qo'ysak, uch qatlamli plastinka va to'ldiruvchining ko'chish va kuchlanishlarini olamiz:

$$\begin{aligned}
u_{xk} &= [-r_{1k}C_{1k}e^{-r_{1k}x} - i(\gamma C_{2k} - sC_{4k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
u_{yk} &= [-i\gamma C_{1k}e^{-r_{1k}x} + (r_{2k}C_{2k} - isC_{3k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
u_{zk} &= [-isC_{1k}e^{-r_{1k}x} + (i\gamma C_{3k} - r_{2k}C_{4k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
\sigma_{xk} &= [(2\gamma^2 + 2s^2 - \omega^2)C_{1k}e^{-r_{1k}x} \\
&\quad + 2i(r_{2k}\gamma C_{2k} - r_{2k}sC_{4k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
\sigma_{yk} &= [(-2r_{1k}^2 + 2s^2 - \omega^2)C_{1k}e^{-r_{1k}x} \\
&\quad - 2(ir_{2k}\gamma C_{2k} + \gamma sC_{3k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
\sigma_{zk} &= [(-2r_{1k}^2 + 2s^2 - \omega^2)C_{1k}e^{-r_{1k}x} \\
&\quad + 2(\gamma sC_{3k} + ir_{2k}sC_{4k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
u_{yk} &= [-i\gamma C_{1k}e^{-r_{1k}x} + (r_{2k}C_{2k} - isC_{3k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
u_{zk} &= [-isC_{1k}e^{-r_{1k}x} + (i\gamma C_{3k} - r_{2k}C_{4k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
\sigma_{yzk} &= [-2\gamma sC_{1k}e^{-r_{1k}x} - (ir_{2k}sC_{2k} - ir_{2k}\gamma C_{4k} - (\gamma^2 \\
&\quad - s^2)C_{3k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\
\sigma_{yk} &= [(-2r_{1k}^2 + 2s^2 - \omega^2)C_{1k}e^{-r_{1k}x} - 2(ir_{2k}\gamma C_{2k} \\
&\quad + \gamma sC_{3k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))},
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\sigma_{zk} = [(-2r_{1k}^2 + 2s^2 - \omega^2)C_{1k}e^{-r_{1k}x} + 2(\gamma s C_{3k} + ir_{2k} s C_{4k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))},$$

$$u_{yk} = [-i\gamma C_{1k}e^{-r_{1k}x} + (r_{2k}C_{2k} - isC_{3k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))},$$

$$u_{zk} = [-isC_{1k}e^{-r_{1k}x} + (i\gamma C_{3k} - r_{2k}C_{4k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))},$$

bunda $A_{jn}, A'_{jn}, \vec{B}_{jn}$, – ixtiyoriy o‘zgarmlar, $H_n^{(1)}(\alpha_j r)$ va $H_n^{(2)}(\alpha_j r)$ – Xankel funksiyalari $H_n^{(1),(2)}(\alpha r) = J_n(\alpha r) \pm iN_n(\alpha r)$.

Ixtiyoriy o‘zgarmlarni topish uchun chegaraviy shartlar (3)-(8) dan foydalansak, bir jinsli bo‘lmagan kompleks koeffisientli algebraik tenglamalar sistemasini olamiz:

$$[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)]\{q\} = \{P_2\}. \quad (16):$$

Bu yerda, $\{q\}$ - ixtiyoriy o‘zgarmlardan tashkil topgan ustun vektor; $\{P_2\}$ - tashqi tushadigan to‘lqin ustun vektori. Bu (16) kompleks koeffisientli algebraik tenglamalar sistemasi Gaussning o‘zgaruvchilarni ketma-ket yo‘qotish usuli yordamida dissertasiyada ishlab chiqilgan algoritm bilan yechiladi.

Tashqi ta‘sir nolga teng bo‘lsa, u holda bir jinsli algebraik tenglamalar sistemasini olamiz. Tenglamalar sistemasining notrivial yechimi mavjud bo‘lishi shartidan quyidagi dispersion tenglamani olinadi:

$$\det[R(k, \omega)] = 0. \quad (17):$$

(17) tenglama Myuller usulida yechiladi.

Noturg‘un to‘lqinlar ko‘p qatlamli plastinkaga yuklanganda qo‘yilgan masalani yechish uchun vaqt bo‘yicha Laplasning integral almashtirishi qo‘laniladi: ($0 < t < T_1$),

$$f^L(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt = L[f(t)]. \quad (18):$$

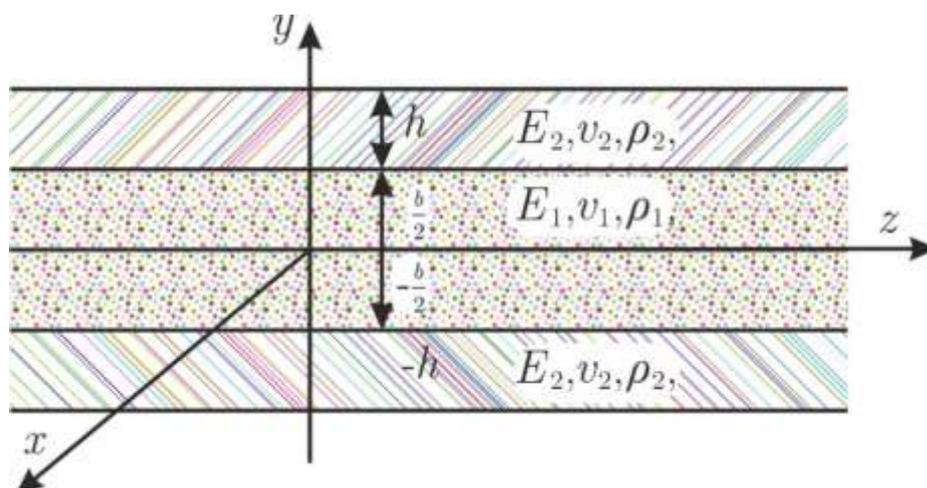
Teskari almashtirish quyidagi integral orali amalga oshiriladi:

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

Integral maxsus nuqtadan o‘ng tomonda joylashgan yo‘l bo‘yicha olinadi.

Dissertasiya ishida deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasining xususiy hosilali integro-differensial tenglamalarini yechish uchun muzlatish, o‘zgaruvchilarni ajratish, Laplas, Myuller, va Gauss usullari qo‘llanilgan. Matlab dasturi asosida sonli natijalar olingan.

Dissertasiyaning **“To‘ldiruvchili uch qatlamli qovushqoq-elastik plastinkada to‘lqin tarqalishi”** deb nomlangan uchinchi bobida garmonik xos to‘lqinlarning qovushqoq-elastik uch qatlamli to‘ldiruvchili plastinkada tarqalishi masalasi yechilgan. Oxz tekislik bilan ustma-ust tushgan, y koordinata esa qalinlik yo‘nalishida bo‘lgan plastinkani qaraymiz. Oz o‘qi yo‘nalishida plastinka bo‘ylab garmonik egilish to‘lqinlari tarqalayotgan bo‘lsin (2-rasm).



2-rasm. Uch qatlamli cheksiz uzun plastinkaning hisob sxemasi

Plastinkaning asosiy materiali $-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$ sohani egallaydi, har birining qalinligi hamma yerda bir xil $b/2$ bo‘lgan, qoplama esa $(-n + b/2 \leq y \leq -h; h \leq y \leq b/2 + h)$ sohani egallaydi. Aytaylik, E, ν, ρ asosiy qatlarning mos ravishda hajmiy siqilish moduli, siljish moduli va material zichligini ifodalasin. U holda asosiy qatlam uchun Reley-Lemb masalasining yechimi o‘zgaruvchilarni ajratish metodi yordamida olinadi va chastota ω , to‘lqin soni k bilan garmonik to‘lqin tarqalishidagi u, v, w (mos ravishda x, y va z o‘qlari yo‘nalishidagi) ko‘chishlar quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi:

$$u = 0; v = (\alpha A_1 ch \alpha x_2 - k C_1 sh \beta x_2) e^{i(\omega t - kz)},$$

$$w = (-ik A_1 ch \alpha y + i \beta C_1 sh \alpha y) e^{i(\omega t - kz)},$$

$-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$ uchun, bu yerda A_1 va C_1 —o‘zgarimaslar, va:

$$\alpha^2 = k^2 - \frac{\omega^2 \rho}{\lambda G + \frac{4}{3} \mu}; \quad \beta^2 = k^2 - \frac{\omega^2 \rho}{\mu}. \quad (19):$$

Izotrop material uchun chiziqli elastiklik nazariyasining kuchlanishlar va deformatsiyalar orasidagi munosabatiga asosan:

$$\sigma_{xz} = (G - 2/3\mu) A_1 (\alpha^2 - k^2) sh \alpha y;$$

$$\sigma_{yy} = A_1 [(G - 2/3\mu) (\alpha^2 - k^2) + 2\mu \alpha^2] sh \alpha y - 2\mu k \beta C_1 sh \beta y;$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xx} = 0; \sigma_{yz} = -2\mu i k A_1 \alpha ch x y + i \mu C_1 (k^2 + \beta^2) ch \beta y;$$

$$\sigma_{yy} = A_1 [(G + 2/3\mu) (\alpha^2 - k^2) + 2\mu \alpha^2] sh \alpha y + 2\mu k \beta C_1 sh \beta y.$$

Harakat tenglamalarini qanoatlantiruvchi yuqori tashqi qatlam nuqtalarining ko‘chishlari uchun ifodalar umumiy holda quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi:

$$u = 0;$$

$$v = -\alpha c [\beta_1 sh \alpha_e (y - H) + F_1 ch \alpha_e (y - H)] + k [D_1 ch \beta_c (y - H) + M_1 sh \beta_c (y - H)];$$

$$w = ik [\beta_1 ch \alpha_e (y - H) + F_1 sh \alpha_e (y - H)] - i \beta_c [D_1 sh \beta_c (y - H) + M_1 ch \beta_c (y - H)].$$

Bu yerda β_1, D_1, F_1, M_1 — o‘zgarimaslar, α_c va β_c parametrlar (19) ga o‘xshash quyidagi munosabatlardan aniqlanadi:

$$\alpha_c^2 = k^2 - \frac{\omega^2 \rho_c}{G_e + \frac{4}{3} \mu_c}; \quad \beta_c^2 = k^2 - \frac{\omega^2 \rho_c}{\mu_c}.$$

Bu yerda c indeks qoplama materialining xarakteristikasiga tegishli.

$-H = -(b_1 + b/2) \leq y \leq -h$ soha uchun eguvchi to'liqinning antisimmetriklik xossasidan foydalanib, shunga o'xshash bog'lanish oilalarini o'lchash mumkin:

$$U(y) = u(-y); \quad v(y) = v(-y); \quad w(y) = -w(-y), \quad (20):$$

(20) yechimning xossalarini hisobga olib, bundan keyin $0 \leq y \leq H$ sohani tekshirish bilan chegaralanamiz. Erkin sirt $y = H$ da quyidagi chetki shartlar bajarilishi kerak:

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yy} = \sigma_{yz} = 0 \quad (21):$$

Bundan tashqari, $y = b$ kontakt sirti ustida ko'chishlarning uzluksizligi sharti:

$$u(b^-) = u(b^+); \quad v(b^-) = v(b^+), \quad w(b^-) = w(b^+), \quad (22):$$

va tenglik sharti:

$$\sigma_{xy}(b^-) = \sigma_{yy}(b^+); \quad \sigma_{yy}(b^-) = \sigma_{xy}(b^+); \quad \sigma_{yz}(b^-) = \sigma_{yz}(b^+); \quad (23):$$

bu yerda, ($b=b/2$), bajarilishi kerak. (21), (22), (23) shartlar asosida va simmetriklik shartiga ko'ra oltita (A_1, B_1, C_1, D_1, F_1 va M_1) o'zgarmlarga nisbatan oltita bir jinsli chiziqli algebraik tenglamalar sistemasini olamiz: $[C]\{q\} = \{0\}$. Bu tenglamalar sistemasi notrivial yechimlarga ega bo'lishi uchun sistema koeffisientlaridan tuzilgan matrisaning determinanti nolga teng bo'lishi kerak:

$$F(\Omega) = [C] = 0. \quad (24):$$

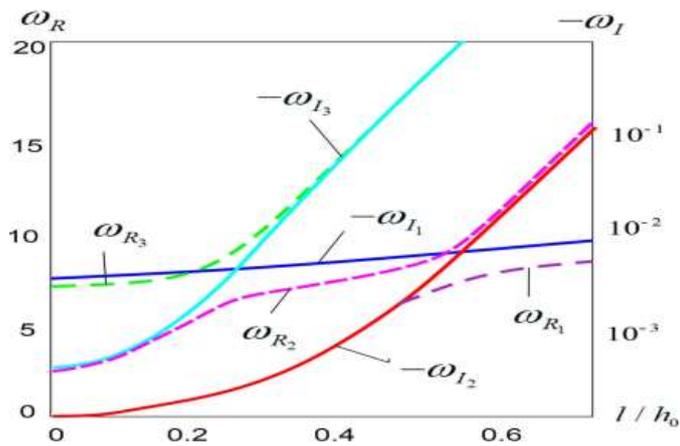
Bu yerda:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \alpha c h a k; \quad C_{12} = -k c h \beta k; \quad C_{13} = \alpha_c s h \alpha_c (b - H); \\ C_{14} &= \alpha_c c h \alpha_c (b - H); \quad C_{15} = k c h \beta_c (b - H); \quad C_{16} = -k s h \beta (b - H); \\ C_{21} &= -k s h a b; \quad C_{22} = \beta s h \beta h; \quad C_{23} = -k c h \alpha_c (b - H); \\ C_{24} &= -k c h \alpha_c (b - H); \quad C_{25} = \beta_c s h \beta_c (b - H); \quad C_{26} = \beta s h \beta_c (b - H); \\ C_{31} &= \alpha_1 s h a b; \quad C_{32} = -2 \mu k \beta s h \beta b; \quad C_{33} = -\alpha_2 c h \alpha_c (b - H); \\ C_{34} &= -\alpha_2 c h \alpha_c (b - H); \quad C_{35} = 2 \mu_c k \beta s h \beta_c (b - H); \\ &] \quad C_{41} = -2 \mu k \alpha c h a h; \quad C_{42} = \mu \alpha_3 c h \beta h; \\ C_{43} &= -2 \mu_c k \alpha_c s h \alpha_c (b - H); \quad C_{44} = -2 \mu_c k \alpha_c c h \alpha_c (b - H); \\ C_{45} &= \mu_c \alpha_1 c h \beta_c (b - H); \quad C_{46} = \mu_c \alpha_1 s h \beta_c (b - H); \\ C_{51} &= C_{52} = C_{54} = C_{55} = 0; \quad C_{53} = -\alpha_3; \quad C_{56} = -2 \mu_c k \beta_c; \\ C_{61} &= C_{62} = C_{63} = C_{66} = 0; \quad C_{64} = -2 \mu_c k \alpha_c; \quad C_{65} = \mu_c \alpha_c. \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = G(k^2 - \alpha^2) - \frac{2}{3} \mu (k^2 + \alpha^2); \quad \alpha_2 = k^2 + \alpha^2;$$

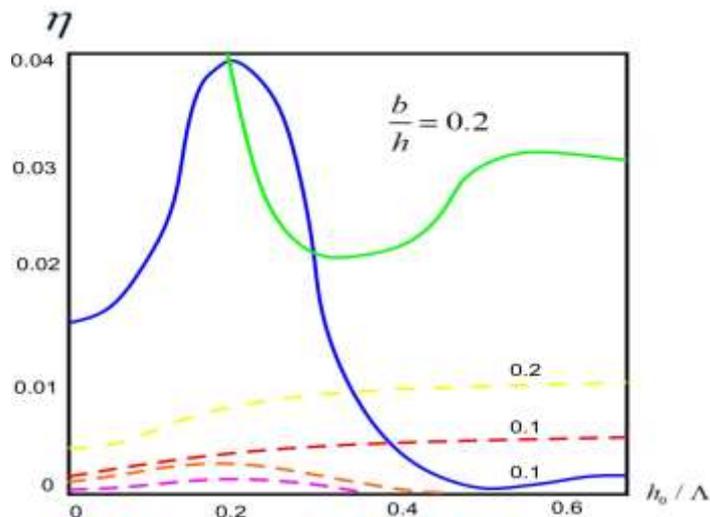
$$\alpha_3 = G(k^2 - \alpha_c^2) - \frac{2}{3} \mu_c (k^2 + 2\alpha_c^2); \quad \alpha_4 = k^2 + \beta_c^2,$$

(24) transendent tenglama Myuller metodi yordamida sonli yechiladi.



3-rasm. Chastotaning haqiqiy va mavhum qismini qalinlikga bog‘liq o‘zgarishi

(21) tenglama Myuller metodi yordamida yechildi. Barcha hollarda o‘rta qatlam va qoplama uchun Puasson koeffisienti mos ravishda 0,30 va 0,25 deb qabul qilindi; $C_{pc} = 5400 \text{ m/s}$; $C_{sc} = 3195 \text{ m/s}$; $C_{lpc} = 2300 \text{ m/s}$; $C_{spk} = 2300 \text{ m/s}$; $\nu_c = 0,30$; $\nu_{pk} = 0,35$; $h/b = 0,1$, $\rho_{cp} = \frac{\rho_{pk}}{\rho_c} = 0,4452$ (qoplama zichligining o‘rta qatlam zichligiga nisbati).



4- rasm. So‘nish koeffisietini to‘lqin uzunligiga bog‘liq o‘zgarishi

Qoplamaning reologik xossalari $A = 0,048$; $\beta = 0,05$; $\alpha = 0,1$. Keltirilgan qiymatlar dyuralevoydan tayyorlangan o‘rta qatlam uchun va akrilondan tayyorlangan qoplama uchun keltirilgan. Koplama (plastinkalar) elastik, to‘ldiruvchi qovushqoq-elastik, ya‘ni konstruksiya dissipativ bir jinsli emas.

Natijalar grafik ko‘rinishida chastotaning haqiqiy qismi va yo‘qotish koeffisienti (koeffisient poteri) ning o‘lchovsiz to‘lqin soniga nisbatan o‘zgarishi (o‘rta qatlam yarim qalinligining to‘lqin uzunligiga nisbati) ko‘rinishida keltirilgan. Hisoblashlarda xos qiymatlarning absolyut xatoligi $14 \cdot 10^{-6}$ atrofida bo‘ldi. Chastotaning haqiqiy va mavhum qismlarining plastinka qalinligiga bog‘liq o‘zgarishi 3–rasmda keltirilgan. 4-rasmda so‘nish koeffisietining to‘lqin uzunligiga bog‘liq o‘zgarishi keltirilgan. Dissipativ bir jinslimas mexanik sistemalar bo‘lgan holda dempferlash koeffitsientining to‘lqin uzunligiga nomoton bog‘lanishi topildi.

Bu yerda dempferlashning global koeffisienti vazifasini birinchi va ikkinchi xususiy chastotalarning mavhum qismlari bajaradi. Bu chastotalar haqiqiy qismlari o'zaro yaqinlashganda xususiy chastotalar birinchi va ikkinchi modalari mavhum qismlarining kesishishi kuzatildi.

Barcha hollarda o'rta qatlamning (2-rasm) Puasson koeffitsiyenti 0,25 ga teng deb qabul qilingan, ρ_c/ρ qatlam va o'rta qatlam materiallari zichligining nisbati 0,35, G_c/μ qatlam materialining hajmiy siqilish modulining o'rta qatlam materialining siljish moduliga nisbati 0,20 qatlam va o'rta qatlamning siljish modullarining nisbati 0,11 ($1+i\gamma$) ga teng deb qabul qilingan, bu yerda γ -tebranish jarayonida yuzaga keladigan siljish deformatsiyalarida energiyaning tarqalishini hisobga oluvchi koeffitsiyent. Keltirilgan qiymatlar elastik alyuminiy o'rta qatlam va yuqori polimer materialdan tayyorlangan qatlamdan iborat sistemaga mos keladi.

Qatlam qalinligining o'rta qatlam yarim qalinligiga nisbati h/b ning turli qiymatlari va siljish deformatsiyalarida materialda γ energiyaning so'nish koeffitsientini turli qiymatlarida ko'rib chiqildi. Natijalar $\Omega_{(\omega^2)}$ haqiqiy qism va $h/x = kh/2\pi$ so'nish koeffitsiyentining o'lchovsiz to'lqin soniga bog'liqlik grafiklari ko'rinishida taqdim etilgan (o'rta qatlam yarim qalinligining to'lqin uzunligiga nisbati). Aniq tenglamalar bo'yicha xos qiymatlarni hisoblashning absolyut xatosi $14 \cdot 10^{-6}$ chegarasida bo'ladi. 3 va 4 -rasmlarda kompleks chastotaning haqiqiy va mavhum qismlarining o'lchamsiz to'lqin uzunligiga bog'liq ravishda o'zgarishi ko'rsatilgan. $\gamma = 0,35$ va qatlamning nisbiy qalinligi $h/b = 1$ ga teng. Dissipativ bir jinsli bo'lmagan mexanik sistemalarda so'nish koeffitsiyentining to'lqin uzunligiga nisbatan nomonoton bog'liqligi aniqlandi.

Dispersion egri chiziqlarning grafiklari qurildi, shuningdek, k^* ning (ω^* , α) tekisligidagi ham musbat, ham manfiy haqiqiy qismlari uchun materialning irsiy xossalarini ifodalovchi k va β parametrlarning turli qiymatlaridagi proeksiyalari ko'rildi. Sonli yechimlar tahlili shuni ko'rsatdiki, m qanchalik katta bo'lsa yoki β ning qiymati qanchalik kichik bo'lsa, musbat va manfiy mavhum qismga ega bo'lgan k^* dispersion egri chiziqlar shunchalik barvaqt va katta uzoqlasha boshlaydi.

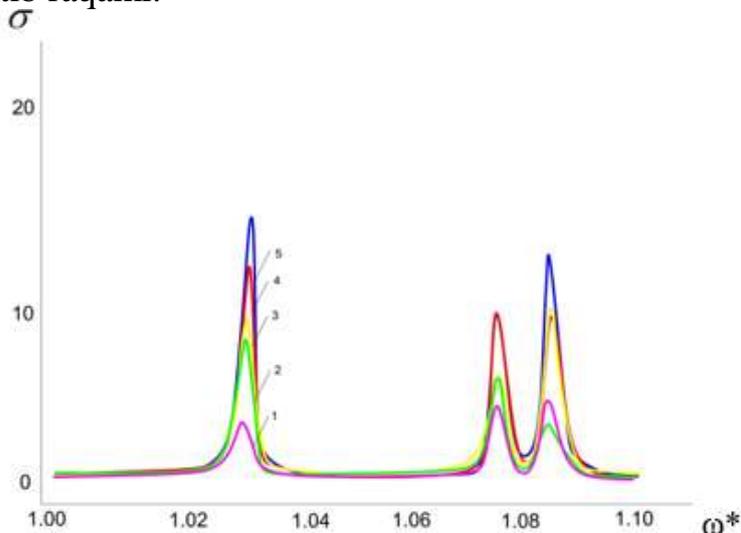
Sonli hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, m ning qiymati kamayib borganda yoki β ning qiymati oshib borganda dispersion egri chiziqlar elastik bo'lgan holga intiladi. Bundan tashqari, aniqlandiki, elastik spektrga tegishli bo'lgan irsiy-elastik spektrning dispersion egri chiziqlari mavhum qismlari manfiy bo'lgan kompleks k^* sonidan iborat bo'ladi, va u yechimning koordinata bo'yicha so'nishini belgilab beradi. 3 va 4- rasmlarda so'nish koeffisientining to'lqin uzunligiga bog'liq o'zgarishi keltirilgan. Bu ham dissipativ bir jinsli bo'lmagan mexanik sistema uchun olingan. Ta'kidlash kerakki, irsiy-elastik spektr uchun "yopilish chastotasi" ($k^* = 0$, $\omega^* > 0$ dispersion tenglama ildizlari bo'lmagani uchun), shuningdek, "chastota minimumi" (chunki tarmoq bo'ylab harakatlanganda ω^* monoton o'sadi) tushunchalari ma'nosini yo'qotadi. Sonli natijalarning tahlili shuni ko'rsatadiki, elastiksimon spektr tarmog'ida yopilish chastotalari va chastotalar minimumlari atrofida irsiy-elastik spektr tarmoqlari eng katta egrilikka ega bo'ladi. m ning

qiymatlarining oshib borishi, shuningdek, β ning qiymatlarining kamayib borishi bu sohalarida dispersion egri chiziqlarning silliqqlanishiga olib keladi. Shunday qilib, elastiksimon spektrni taqriban irsiy-elastik spektr uchun $m \rightarrow 0$, $\beta \gg 1$ da asimptotik deb qarash mumkin.

Dissertasiyaning “**Qovushqoq–elastik uch qatlamli plastinkalarning garmonik yuklanishlar ta‘siridagi dinamik kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holati**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida garmonik yuklanishlar ta‘siridagi ko‘p qatlamli plastinkalar sistemasida hosil bo‘ladigan dinamik kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holati (DK-DH) o‘rganilgan. DK-DH ni kamaytirish (optimallashtirish) uchun dissipativ bir jinsli bo‘lmagan mexanik sistemalar uchun uchinchi bobda olingan natijalar asosida muammo yechimining yangi qirralari topilgan. Oxz kordinatalar sistemasida tashqi garmonik kuchlar ta‘sirida va tekis deformatsiya holatida bo‘lgan qatlamlardan tashkil topgan dissipativ mexanik sistemaning DK-DH ni ko‘ramiz. Faraz qilaylik, qatlamlar orasida qattiq mahkamlanganlik sharti bajarilsin. U holda chegaraviy shartlar quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi:

$$\begin{aligned} \sigma_{33}^1(x, 0, t) = -p(x)e^{-i\omega t}, \sigma_{13}^1(x, 0, t) = 0, \\ \sigma_{33}^k(x, h_k, t) = \sigma_{33}^{k+1}(x, h_k, t), \sigma_{13}^k(x, h_k, t) = \sigma_{13}^{k+1}(x, h_k, t), \\ u_k(x, h_k, t) = u_{k+1}(x, h_k, t), \vartheta_k(x, h_k, t) = \vartheta_{k+1}(x, h_k, t), \kappa = 1.2 \dots n. \end{aligned} \quad (25):$$

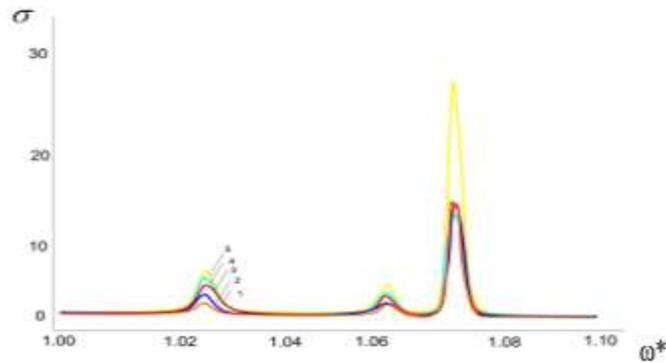
Bu yerda, ω - faqat haqiqiy qiymatlarni qabul qiluvchi kattalik, k - qatlamlarning tartib raqami.



5-rasm. Kuchlanish amplitudasining chastotaga bog‘liq o‘zgarishi. (dissipativ bir jinsli sistema)

1. $E_2/E_1 = 0.15; h_2/h_1 = 3.0;$ 2. $E_2/E_1 = 0.25; h_2/h_1 = 2.25;$
3. $E_2/E_1 = 0.35; h_2/h_1 = 2.15;$ 4. $E_2/E_1 = 0.45; h_2/h_1 = 1.5;$
5. $E_2/E_1 = 0.5; h_2/h_1 = 1.5;$ 6. $E_2/E_1 = 0.60; h_2/h_1 = 0.7$

Sonli natijalar uch qatlamli plastinka uchun olingan. Birinchi holatda dissipativ bir jinsli mexanik sistema olingan. Bu holatda barcha qatlamlar qovushqoq-elastik.



6-rasm. Kuchlanish amplitudasining chastotaga bog'liq o'zgarishi (dissipativ bir jinsli bo'lmagan sistema) .

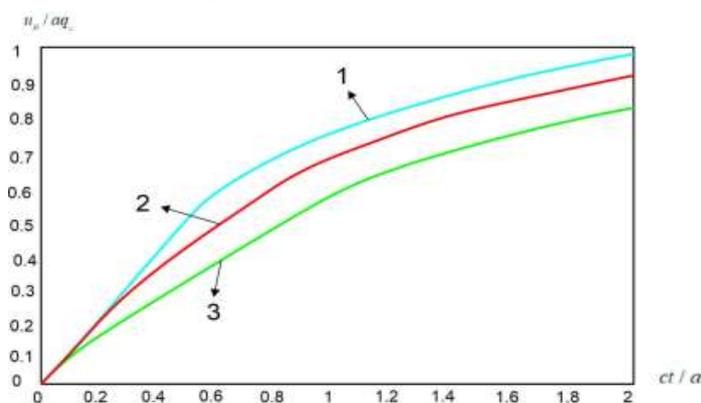
1. $E_2/E_1 = 0.15; h_2/h_1 = 3.0;$ 2. $E_2/E_1 = 0.25; h_2/h_1 = 2.25;$
3. $E_2/E_1 = 0.35; h_2/h_1 = 2.15;$ 4. $E_2/E_1 = 0.45; h_2/h_1 = 1.5;$
5. $E_2/E_1 = 0.5; h_2/h_1 = 1.5;$ 6. $E_2/E_1 = 0.60; h_2/h_1 = 0.7$

Qatlamlarning qovushqoqligini ifodalovchi relaksatsiya yadrolar amplitudasi bir biridan farq qiladi. Qolgan parametrlar (α, β lar) bir xil, barcha qatlamlar uchun. Boshqa parametrlarning ko'chishlar va kuchlanishlarga ta'siri 5-10 foizdan oshmasligi F.B. Badalov tomonidan ko'rsatib o'tilgan. Bu tenglamalar sistemasi Gauss usuli bilan yechiladi. Yuqori va pastki plastinkalarning fizik-mexanik xususiyatlari ($\rho_{qatlam}/\rho_{pol} = 1.333; \nu_1 = 0.35; \nu_2 = 0.25, A = 0,048; \beta = 0,05; \gamma = 0.1; \alpha = 0,1$) bir xil deb olingan.

Dissipativ bir jinsli mexanik sistemalar uchun olingan sonli natijalar 6-rasmda keltirilgan. Tashqi garmonik kuch ta'sirida mexanik sistemaning $z = h = 1, x = 0$ nuqtadagi DK-DH (dinamik kuchlanganlik- deformatsiyalanganlik holati) ni xarakterlovchi kuchlanish amplitudasi $|A_{\sigma_{33k}}|$ ning chastotaga bog'liqligi o'rganildi ($|A_{\sigma_{33k}}| = |\sigma_{33}(x, z)/\sigma_{33}^p(x, 0)|$). Mexanik sistema bo'yicha rezonans amplitudani to'la so'ndirishda Safarov I.I va Tryanovskiy I.E. lar tomonidan kiritilgan global rezonans amplitudasi (GRA) dan foydalanildi:

$$\delta_{\sigma_{33k}} = \max_{\gamma} (|A_{\sigma_{33k}}|). \quad (26):$$

Bir jinsli mexanik sistemada global rezonans amplitudasi rolini birinchi chastotaga mos keluvchi rezonans amplituda o'ynaydi. Kuchlanish amplitudasining chastotaga bog'liq o'zgarishi dissipativ bir jinsli bo'lmagan sistema uchun 6-rasmda keltirilgan.



7-rasm. Vertikal ko'chishni vaqtga bog'liq o'zgarishi

1-egri chizik yarim tekislik markazidagi nuqta (0,0); 2-(0.35l,0); 3-(0.45l,0)

Yarim tekislikda nostasionar kuch taʼsirida hosil boʻlgan DK-DH topamiz. Lame tenglamasiga Grin-Lemb almashtirilishi qoʻllanadi va toʻlqin tenglamalari olinadi. Olingan tenglamaga vaqt boʻyicha Laplas va koordinata boʻyicha Furʼe almashtirishi orqali yechiladi. Vertikal koʻchishning (u_y/a) ($y=1$ nuqtasidagi) oʻlchamsiz ($c_s t/a$) vaqtga bogʻliq oʻzgarishi 7–rasmda keltirilgan. Natijalar yarim tekislikda yotuvchi elastik qatlamga Xevsayd funksiyasi koʻrinishdagi yuklanish qoʻyilgan hol uchun olingan. Natijalar A(0,0), B(0.25,0), S(0.40) nuqtalar uchun olingan. Rasmdan koʻrinib turibdiki, koʻchishlar vaqt oʻtishi bilan asimptotikaga intilar ekan.

UMUMIY XULOSALAR

1. Uch qatlamli qovushqoq-elastik toʻldiruvchili plastinkada xos toʻlqin tarqalishi (qatlamlar orasida turli xil kontakt shartlari bajarilganda) masalasini materiallarning qovushqoqlik xossalarini hisobga olgan holda yechish metodikasi va algoritmi ishlab chiqilgan. Ishlab chiqilgan metodika matematik-fizika fanining maxsus funksiyalar usuli, Myuller va Gauss usulari, Fure va Laplasning integral almashtirishi, Grin -Lembning potensial funksiyalari usullariga asoslangan.

2. Koʻp qatlamli qovushqoq-elastik plastinkalar uchun tashqi yuklanish taʼsirida majburiy toʻlqin tarqalishi masalasini qatlamlar orasida turli xil kontakt shartlari bajarilganda, materialning qovushqoqlik xossalarini hisobga olgan holda, matematik qoʻyilishi, yechish uslubiyoti va algoritmi ishlab chiqilgan.

3. Mexanik sistemada tashqi garmonik kuchlar taʼsirida hosil boʻladigan koʻchish va kuchlanishlarning rezonans amplitudasini kamaytirish muammosi (bir necha barobar) ni yechish uslubiyoti va algoritmi ishlab chiqilgan.

4. Rezonans amplitudasini oʻrganish uchun global rezonans amplituda (GRA) tushunchasidan foydalanilgan va uning fizik mohiyati sonli eksperiment yordamida asoslab berilgan. Rollarning almashishi (RA) nuqtasida energiya dissipasiyasining intensiv boʻlishi topilgan. Bu nuqtada global soʻnish koeffisienti (GSK) maksimumga, global rezonans amplituda (GRA) esa minimumga ega boʻlishi topilgan.

5. Dissipativ mexanik sistemaning amplituda-chastota xarakteristikasi (ACHX) kichik toʻlqin sonli sohasi ($\gamma h < 0.2$) da katta toʻlqin sonli soha ($\gamma h > 1$) ga qaraganda 20%-30% gacha koʻp boʻlishi mumkinligi topilgan.

6. Disipativ bir jinsli va bir jinsli boʻlmagan silindrik mexanik sistemalar uchun xos tebranishlar hamda majburiy tebranishlar uchun olingan natijalar bir-birini toʻldirishi topilgan. Disipativ mexanik sistema majburiy tebranishlar amplitudasining global rezonans amplitudasi orqali baholanishi va uning dissipativ bir jinsli boʻlmagan mexanik sistema uchun nomonoton oʻzgarishi topilgan.

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

**БУХАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

НАРЗУЛЛОЕВ МУХАММАД АЗАМАТОВИЧ

**КОЛЕБАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ТРЕХСЛОЙНЫХ
ПЛАСТИНАХ С ВЯЗКО-УПРУГИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ**

01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктор философии (Doctor of philosophy) по техническим наукам

Бухара – 2025

Тема диссертации на соискание учёной степени доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована с номером B2025.4.PhD/T1073 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/](https://bstu.uz/)) и на Информационно-образовательном портале “Ziyonet” (www.ziyonet.uz)

Научный руководитель:	Тешаев Мухсин Худойбердиевич доктор физико-математических наук (DSc)
Официальные оппоненты:	Исмаилов Кубаймурад доктор технических наук, профессор Юлдашев Шарафиддин Сайфиддинович доктор технических наук, профессор
Ведущая организация:	Ташкентский государственный транспортный университет

Защита диссертации состоится 11-ноябр 2025 г. в 10:00 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 № 480). (Адрес:Бухарская область, 200100, г. Бухара, ул. К. Муртазаева, 15. Тел.: (+99895) 604-44-70).

Автореферат диссертации разослан 25-октября 2025 года.
(протокол рассылки № 1 от 9 сентября 2025 г.)



И.И Сафаров

Председатель разового научного совета по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук, проф.

Р.А. Сабирова

Ученый секретарь разового научного совета по присуждению ученых степеней, доктор философии по физико-математическим наукам (PhD)

З.И. Болтаев

Председатель разового научного семинара при разовом научном совете по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук (DSc), проф.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. Во всем мире многие элементы конструкций, встречающиеся в технике и строительстве, состоят из трёхслойных панелей с наполнителем, и исследование их динамического состояния при взаимодействии с другими деталями через различные деформируемые элементы является одной из важных задач. В связи с этим, изучение вопросов распространения волн в трехслойных пластинчатых конструкциях, взаимодействующих с основанием, позволяет очень точно представить себе резонансные состояния, возникающие в результате любых динамических воздействий в современных строительных конструкциях, самолетостроении, судостроении и машиностроении. В связи с этим во многих зарубежных странах, включая США, Канаду, Россию и другие развитые страны, особое внимание уделяется эффективности использования трехслойных пластин для решения проблем борьбы с вибрацией и шумом в движущихся транспортных средствах.

В мире проводятся научные исследования, направленные на изучение состояния динамических процессов, возникающих в результате распространения собственных волн при внешних нагрузках в многослойной пластинке, а также на совершенствование конструкций. В этом направлении, в частности, проводятся научно-исследовательские работы, направленные на оценку динамического состояния конструкций под воздействием внешних сил, поскольку многие части самолётов и движущихся транспортных средств состоят из двух- и трёхслойных конструкций. В этом отношении конструкции в основном моделируются как трёхслойные панели с наполнителем, и с учётом жёсткости и вязкости наполнителя трёхслойной панели необходимо разработать методы определения параметров, характеризующих их динамическое состояние (волновое число, частота, фазовая скорость и форма колебаний). Одной из важных задач также является совершенствование методов снижения динамических напряжений и деформаций, возникающих в трёхслойной панели.

В нашей республике в настоящее время проводятся комплексные мероприятия, направленные на снижение негативных явлений, возникающих в трёхслойных панелях, а также на повышение прочности конструкции за счёт выбора жёсткости взаимодействующих слоёв панели. В Указе Президента Республики Узбекистан от 30 мая 2022 года № ПФ-144 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы сейсмической безопасности Республики Узбекистан»², а также в Указе Президента от 7 мая 2020 года № ПҚ-4708 «О мерах по повышению качества образования в области математики и развитию научных исследований» определены соответствующие задачи. В этом контексте одной из важных задач является

² В Указе Президента Республики Узбекистан от 30 мая 2022 года № ПФ-144 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы сейсмической безопасности Республики Узбекистан»

устранение колебаний в резонансной области у трёхслойных панелей, взаимодействующих с деформируемой средой.

"Диссертационная работа в определённой степени способствует выполнению задач, установленных в Указе Президента Республики Узбекистан от 16 мая 2023 года № ПК-158 «О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территорий Республики Узбекистан», а также в указах «О повышении качества образования в области математики» и от 17 апреля 2024 года № ПК-161 «О мерах по повышению сейсмостойкости зданий и сооружений и совершенствованию мониторинга сейсмической опасности», а также в других нормативно-правовых актах, связанных с данной деятельностью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Данное исследование выполнено в рамках приоритетного направления развития науки и инновационных технологий Республики IV. «Математика, механика, сейсמודинамика сооружений и информатика».

Степень изученности проблемы.

Теоретические и прикладные научные исследования по проблеме распространения волн в трёхслойных пластинах проводились такими зарубежными учёными, как А.А. Илюшин, Уайт, И.Д. Грудзев, А.Г. Горшков, Б.Е. Победря, А.Н. Гузь, И.Е. Трояновский, Р. Митра, А.С. Волмир, Ф.Г. Абдула-Заде, Р. Александр, А.А. Васин, М.В. Васина, В.И. Желтков, Чан Тхан Хай, Е.А. Девянин, А.Б. Ленский, Ю.И. Новичков, К. Кремер, А.Н. Лапутин, А.Н. Антонов, Я.А. Луговая, Ли Сяовэй, С. О. Роже, Дж. Альтьеро Николас, Г. Ванневиль, М. Бурж, Ж.М. Гарсье, М. Гийо, Г. Пумара и другими.

В Республике по данной проблеме научные исследования проводились такими учёными, как Х.А. Рахматулин, М.Т. Уразбоев, Т.Р. Рашидов, Ю.Н. Мубораков, Т.Ш. Ширинкулов, В.К. Кабулов, Б.М. Мардонов, К.С. Султонов, Ш.М. Маматкулов, М.М. Мирсаидов, И.К. Мирзаев, Ф.Б. Бадалов, Г.Х. Ходжметов, А.А. Ишанходжаев, Т.М. Мавлонов, А. Абдусатторов, И.И. Сафаров, М.Х. Тешаев, Ш.С. Юлдашев, З.И. Болтаев и другие и достигнуты определенные результаты. Они развивали методы исследования напряжённо-деформированного состояния в трёхслойных пластинах, взаимодействующих с деформируемой средой, при статических и динамических нагрузках с учётом реологических свойств материалов.

В то же время В.В. Болотин и Ю.Н. Новичков в своей работе «Многослойные механические конструкции» изучали статические и динамические задачи многослойной пластины, не учитывая взаимодействия с деформируемой средой и вязкость.

А.Г. Горшков, Е.И. Старовойтов, А.В. Яровая в работе «Вязко-пластические элементы слоистых механических конструкций», при решении задач собственных и вынужденных колебаний многослойной пластины получили асимптотические решения с использованием специальных

функций. Частоты, полученные ими, являются действительными числами, и в расчетах в основном использовались асимптотические формулы.

В предлагаемой диссертационной работе предпринята попытка устранения вышеуказанных недостатков. В диссертационной работе выведены уравнения движения трёхслойных пластин, взаимодействующих с деформируемой средой, с учётом вязких свойств материала, а также проведены исследования по созданию алгоритмов и программ для решения задач при различных граничных условиях.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, в котором выполнялась диссертация. Исследование диссертации выполнено в рамках научно-исследовательской темы М.01.2017 «Применение уравнений механики и математической физики», предусмотренной в плане научно-исследовательских работ Бухарского государственного технического университета на 2017–2025 годы.

Целью исследования является разработка метода и алгоритма для изучения задач распространения собственных и вынужденных волн в трёхслойной пластине с наполнителем с учётом вязко-упругих свойств, включая определение комплексной частоты, фазовой скорости, волнового числа и формы колебаний, построение амплитудно-частотной характеристики смещения, а также получение численных результатов и их анализ.

Задачи исследования:

разработка математической постановки, методики и алгоритма решения задач распространения волн в трехслойной пластинке с наполнителем с учетом вязкоупругих свойств материалов;

разработка математической постановки, методики и алгоритма решения задач распространения собственных волн в трехслойной пластине с наполнителем, взаимодействующей с деформируемой средой, с учетом вязкоупругих свойств материалов;

дать сравнительную оценку изменения комплексных частот трёхслойной пластины в зависимости от волнового числа и жёсткости наполнителя;

исследование амплитуд перемещений и напряжений среды при распространении вынужденной волны в трехслойной вязкоупругой пластине с наполнителем в зависимости от изменения жесткости наполнителя и сравнение с существующими экспериментальными результатами

Объектом исследования является трёхслойная пластина с наполнителем, обладающая вязкоупругими свойствами.

Предметом исследования являются разработанные методики и алгоритмы исследования распространения волн в трехслойной пластинке с вязкоупругим наполнителем.

Предметом исследования являются разработанные методики и алгоритмы для изучения распространения волн в вязкоупругой трёхслойной пластине с наполнителем.

Методы исследования. В процессе исследования для решения поставленных задач были использованы метод разделения переменных, метод конечных элементов, методы Гаусса и Мюллера, а также специальные функции.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана методика и алгоритм использования ядра Ржаницына-Колтунова в интегральных уравнениях Больцмана-Вольтера с учётом релаксационных процессов материала при решении задач колебаний и распространения волн в трёхслойных диссипативно неоднородных пластинах;

впервые получено дисперсионное уравнение, выраженное через комплексно-аргументные тригонометрические и трансцендентные функции, описывающее затухающие колебания и распространение собственных волн в трёхслойных вязкоупругих (диссипативно- однородных и неоднородных) пластинах в зависимости от длины волны, комплексного волнового числа и частоты;

на основе численных результатов установлена нерегулярная зависимость длины волны собственных волн, распространяющихся в трёхслойных диссипативно однородных и неоднородных пластинах, от коэффициента затухания и мнимых частей первой, второй и третьей собственных частот;

при распространении вынужденных волн в трёхслойной вязкоупругой пластине наблюдается зависимость изменений амплитуд смещений и напряжений среды от жёсткости заполнителя; в диссипативно- неоднородном состоянии выявлен эффект интенсивного рассеяния энергии в низкочастотных областях и снижения интенсивности на высоких частотах.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана методика определения дисперсионных соотношений и декрементов коэффициентов затухания, возникающих при распространении волн в трёхслойной пластине с вязкоупругим наполнителем, с учётом влияния жёсткости наполнителя на резонансные явления;

в неоднородных вязкоупругих механических системах обнаружены точки интенсивного рассеяния энергии, в которых глобальный коэффициент затухания (ГКЗ) достигает максимума, а глобальная резонансная амплитуда (ГРА) — минимума.

Достоверность результатов исследования объясняется корректной постановкой краевых задач, строгостью выведенных математических выражений, использованием обоснованных методов решения и оценкой точности решений, а также сопоставлением с решениями других математически поставленных задач.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования объясняется разработанной методикой и алгоритмом исследования распространения волн в трёхслойной пластине с деформируемым вязкоупругим наполнителем.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные методика, алгоритм и программы служат для нахождения оптимальных значений параметров для устранения резонансных явлений слоев при дорожном строительстве.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по методам и алгоритму расчета динамического напряженно-деформированного состояния задач распространения волн и колебаний в трехслойной пластинке с наполнителем:

разработанные в диссертации дисперсионные соотношения, описывающие распространение собственной волны в трехслойных пластинах с вязкоупругим наполнителем использовано в фундаментальном проекте ОТ-Ф4-01 "Разработка методов и развитие теории изучения нелинейного динамического напряженно-деформированного состояния криволинейных участков многослойных композитных труб с вязкой жидкостью под воздействием температурных и динамических нагрузок," выполненном в рамках Государственной научно-технической программы Ташкентского химико-технологического института (справка Ташкентского химико-технологического института No 1/01-2410 от 8 июля 2025 года). В результате создана возможность анализа нелинейного динамического напряженно-деформированного состояния многослойных композитных трубопроводов, по которым течет вязкая жидкость, под воздействием динамических нагрузок;

метод уменьшения резонансных амплитуд перемещений и напряжений механической системы, возникающих под действием внешних сил, был использован в организации "Управление эксплуатации Аму-Бухарского машинного канала" для уменьшения амплитуды резонансных перемещений механизмов (акт "Управления эксплуатации Аму-Бухарского машинного канала" от 26 июня 2025 г.). В результате удалось снизить резонансную амплитуду насоса NDS (D6300-80) до 27%.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 20 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 объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы. Объём диссертации составляет 105 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость проведённых исследований, сформулированы цель и задачи исследования, описаны объект и предмет, указана соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики, изложены научная новизна и практические результаты, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их

научная и практическая значимость, приведены данные о внедрении результатов исследования в практику, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **"Анализ литературы, посвященной распространению волн в трехслойных вязкоупругих пластинах с наполнителем"** проведен краткий анализ литературы, посвященной изучению состояния динамических процессов, возникающих в результате распространения собственных волн и внешней нагрузки в вязкоупругой многослойной пластине. На основе анализа литературы сделаны выводы. Применяемые методы и задачи волновой динамики в основном изучены для диссипативно-однородных и неоднородных, т.е. вязкоупругих многослойных пластин. Результаты анализа показывают, что динамическое напряженно-деформированное состояние, возникающее при воздействии гармонических волн на пластинчатые слоистые сооружения, зависит от длины распространяющейся волны. Показано, что в ряде случаев при расчете резонансных состояний, возникающих при воздействии гармонических волн в сооружениях, связанных со средой, не учитывать вязкоупругие свойства среды и свойства диссипативной неоднородности может привести к большим ошибкам.

Во второй главе диссертации **"Постановка, методика и алгоритм решения задачи распространения волны в протяженной трехслойной пластинке с наполнителем"** приведены постановка, методика и алгоритм решения задачи распространения волн в протяженной трехслойной пластинке с наполнителем. Пластина с трехслойным наполнителем рассматривалась как диссипативно-однородная и неоднородная конструкция, и изучалась задача о распространении волн.

Предположим, что в декартовой системе координат (рис. 1) задана трехслойная конструкция с наполнителем. Уравнение динамического движения элементарного параллелепипеда, выделенного из трехслойной пластинки, в векторном виде выглядит следующим образом:

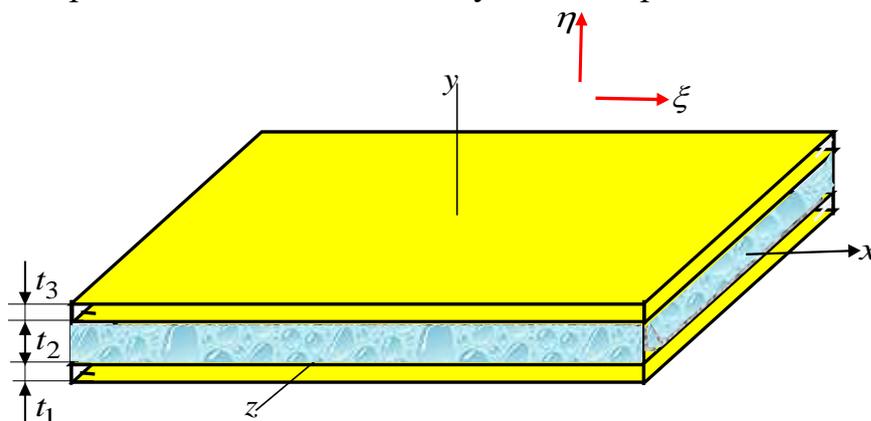


Рис. 1. Схема расчёта трёхслойной пластины

$$(\tilde{\lambda}_k + 2\tilde{\mu}_k)\text{graddiv}\vec{u}_k - \tilde{\mu}_k\text{rotrot}\vec{u}_k + \vec{b}_k = \rho_k \frac{\partial^2 \vec{u}_k}{\partial t^2}. \quad (1):$$

Здесь $\tilde{\lambda}_k$ и $\tilde{\mu}_k$ ($k=1,2,3$ -соответствует параметрам слоя) - операторные модули упругости, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\tilde{\lambda}_k f(t) &= \lambda_{0k} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\lambda}^{(k)}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \\ \tilde{\mu}_k f(t) &= \mu_{0k} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\mu}^{(k)}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right];\end{aligned}\quad (2):$$

\vec{b}_k - объемная сила, $f(t)$ - произвольная функция, ρ_k - плотность материала, $R_{\mu}^{(k)}(t-\tau)$ и $R_{\lambda}^{(k)}(t-\tau)$ - ядра релаксации, λ_{0k}, μ_{0k} - мгновенные модули упругости материала, \vec{u}_j - вектор перемещений.

Если рассматривается конструкция, состоящая из трехслойных пластин с наполнителем, то между слоями ставится условие жесткого контакта:

$$\begin{aligned}z = h_k; \sigma_{zzk} &= \sigma_{zz(k+1)}; \sigma_{yzk} = \sigma_{yz(k+1)}; \sigma_{xyk} = \sigma_{xy(k+1)}; \\ u_k &= u_{k+1}; \vartheta_k = \vartheta_{k+1}; w_k = w_{k+1}.\end{aligned}\quad (3):$$

Если между слоями ставится условие скольжения (при отсутствии сопротивления между слоями), то:

$$\begin{aligned}r = a_k; \sigma_{zzk} &= \sigma_{zz(k+1)}; \sigma_{zyk} = \sigma_{zyk} = 0; \\ \sigma_{xy(k+1)} &= \sigma_{xy(k+1)} = 0; w_k = w_{k+1}.\end{aligned}\quad (4):$$

Если учитывается сопротивление между слоями, тогда:

$$\begin{aligned}z = h_k; \sigma_{zzk} &= \sigma_{zz(k+1)}; \sigma_{zyk} = \sigma_{zxk} = k_z \sigma_{zzk}; \\ \sigma_{zy(k+1)} &= \sigma_{zx(k+1)} = k_z \sigma_{zz(k+1)}; w_k = w_{k+1}.\end{aligned}$$

На свободной поверхности пластины накладывается условие освобождения от напряжений:

$$r = a_k; \sigma_{rrN} = 0; \sigma_{r\theta N} = 0; \sigma_{r_z N} = 0.\quad (5):$$

Если между слоями помещен безмассовый элемент, то граничное (контактное) условие для задачи плоского деформированного состояния будет следующим образом:

$$\begin{aligned}z = h_k; \sigma_{zzk} &= \sigma_{zz(k+1)}; \sigma_{zxk} = \sigma_{zx(k+1)}; \\ \sigma_{zzk} &= \bar{k}_z (u_{zk} - u_{z(k+1)}); \\ \sigma_{zxk} &= \bar{k}_x (u_{xk} - u_{x(k+1)}).\end{aligned}\quad (6):$$

На границах пластины можно наложить условие жёсткого закрепления. Для этого:

$$u_k = 0; v_k = 0; w_k = 0.\quad (7):$$

Пусть у пластины с наполнителем при $x = 0$ перемещения во внешних слоях в перпендикулярном направлении ограничены, тогда:

$$\sigma_{rr1} = 0; u_{y1} = 0; \sigma_{xy1} = 0.\quad (8):$$

Если радиальная координата в сооружении стремится к бесконечности, то потенциалы продольной и поперечной волн удовлетворяют условию

поглощения Зоммерфельда. Помимо граничных и контактных условий ставятся также начальные условия:

$$\begin{aligned} u_{xk}|_{t=0} = 0, u_{yk}|_{t=0} = 0, u_{zk}|_{t=0} = 0, \\ \frac{\partial u_{xk}}{\partial t}\Big|_{t=0} = 0, \frac{\partial u_{yk}}{\partial t}\Big|_{t=0} = 0, \frac{\partial u_{zk}}{\partial t}\Big|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (9):$$

Здесь $u_{rj}, u_{\theta j}, u_{zj}$ - компоненты вектора перемещения. Перемещения слоёв имеют следующий вид:

$$\vec{u}_j = \text{grad}\phi_j + \text{rot}\vec{\psi}_j, \text{div}\vec{\psi} = 0.$$

Это выражение в системе декартовых координат имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} u_{xk} &= \frac{\partial \phi_k}{\partial x} + \frac{\partial \psi_{zk}}{\partial y} - \frac{\partial \psi_{yk}}{\partial z}, \\ u_{yk} &= \frac{\partial \phi_k}{\partial y} + \frac{\partial \psi_{xk}}{\partial z} - \frac{\partial \psi_{zk}}{\partial x}, \\ u_{zk} &= \frac{\partial \phi_k}{\partial z} + \frac{\partial \psi_{yk}}{\partial x} - \frac{\partial \psi_{xk}}{\partial y}. \end{aligned} \quad (10):$$

Здесь ϕ_k - потенциал продольной волны, $\vec{\psi}_k(\psi_{xk}, \psi_{yk}, \psi_{zk})$ - потенциал поперечной волны. Если подставить выражение (10) в (1), тогда получим дифференциальные уравнения в частных производных с комплексными коэффициентами следующего вида:

$$\begin{aligned} (1 - i\Gamma_{\lambda\mu k})\nabla^2 \phi_k &= \frac{1}{C_{p0k}^2} \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial t^2}, \\ (1 - i\Gamma_{\mu k})\nabla^2 \vec{\psi}_k &= \frac{1}{C_{s0k}^2} \frac{\partial^2 \vec{\psi}_k}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (11):$$

Здесь, ∇^2 - оператор Лапласа., $C_{p0k}^2 = (\lambda_{0k} + 2\mu_{0k})/\rho_k, C_{s0k}^2 = \mu_{0k}/\rho_k$ - соответственно скорости продольных и поперечных волн,

$$\Gamma_{\mu k} = -i\Gamma_{\mu k}^{(c)}(\omega_R) + \Gamma_{\mu k}^{(s)}(\omega_R), \Gamma_{\lambda\mu k} = -i\Gamma_{\lambda\mu k}^{(c)}(\omega_R) + \Gamma_{\lambda\mu k}^{(s)}(\omega_R).$$

Используя выражение (10), получаем напряжения в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{yk} &= -\omega^2 \phi + 2\left(-\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_{xk}}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 \psi_{zk}}{\partial x \partial y}\right), \\ \sigma_{zk} &= -\omega^2 \phi + 2\left(-\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_{yk}}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \psi_{xk}}{\partial x \partial z}\right), \\ \sigma_{xk} &= -\omega^2 \phi + 2\left(-\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_{zk}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \psi_{yk}}{\partial x \partial z}\right), \\ \sigma_{xyk} &= 2\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \psi_{zk}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \psi_{zk}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_{xk}}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \psi_{yk}}{\partial y \partial z}, \\ \sigma_{xzk} &= 2\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi_{yk}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_{yk}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_{zk}}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 \psi_{xk}}{\partial x \partial y}, \end{aligned} \quad (12):$$

$$\sigma_{yzk} = 2 \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 \psi_{xk}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \psi_{xk}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_{yk}}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \psi_{zk}}{\partial x \partial z}.$$

Предполагая, что волны затухают, ищем решение (11) при $x \rightarrow \infty$ в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_k &= C_{1k} e^{-r_{1k}x} e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ \vec{\psi}_k &= \vec{C}_k e^{-r_{2k}x} e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \end{aligned} \quad (13):$$

где C_{1k} и $\vec{C}_k = \{C_{3k}, C_{4k}, C_{2k}\}^T$ - произвольные постоянные, $\omega = \omega_R + i\omega_I$ - комплексная частота, γ, s - волновые числа соответственно по осям y и z .

Если подставить (13) в (11), то получаем следующую связь между r_{1k}, r_{2k} с параметрами γ, s, ω :

$$\begin{aligned} r_{1k} &= \sqrt{\gamma^2 + s^2 - \bar{k}^2 \omega^2}, \\ r_{2k} &= \sqrt{\gamma^2 + s^2 - \omega^2}, \\ k &= \sqrt{(1 - 2\nu)/2(1 - \nu)}. \end{aligned} \quad (14):$$

Параметр $\bar{k}^2 = k^2 \Gamma_k$ изменяется начиная с $k = 0$.

Если $\nu = 0.5$, тогда $k^2 = 0.5$. Если $x \rightarrow \infty$, то условие затухания волны будет $\gamma^2 + s^2 > \omega^2$. Если учитывать полученное решение (13) и подставить его в уравнения (11) и (12), то получим перемещения и напряжения трёхслойной пластинки и заполнителя:

$$\begin{aligned} u_{xk} &= [-r_{1k} C_{1k} e^{-r_{1k}x} - i(\gamma C_{2k} - s C_{4k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ u_{yk} &= [-i\gamma C_{1k} e^{-r_{1k}x} + (r_{2k} C_{2k} - i s C_{3k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ u_{zk} &= [-i s C_{1k} e^{-r_{1k}x} + (i\gamma C_{3k} - r_{2k} C_{4k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ \sigma_{xk} &= [(2\gamma^2 + 2s^2 - \omega^2) C_{1k} e^{-r_{1k}x} \\ &\quad + 2i(r_{2k} \gamma C_{2k} - r_{2k} s C_{4k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ \sigma_{yk} &= [(-2r_{1k}^2 + 2s^2 - \omega^2) C_{1k} e^{-r_{1k}x} \\ &\quad - 2(ir_{2k} \gamma C_{2k} + \gamma s C_{3k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ \sigma_{zk} &= [(-2r_{1k}^2 + 2s^2 - \omega^2) C_{1k} e^{-r_{1k}x} \\ &\quad + 2(\gamma s C_{3k} + i r_{2k} s C_{4k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ u_{yk} &= [-i\gamma C_{1k} e^{-r_{1k}x} + (r_{2k} C_{2k} - i s C_{3k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ u_{zk} &= [-i s C_{1k} e^{-r_{1k}x} + (i\gamma C_{3k} - r_{2k} C_{4k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ \sigma_{xyk} &= [2ir_{1k} \gamma C_{1k} e^{-r_{1k}x} - ((r_{2k}^2 + \gamma^2) C_{2k} - i r_{2k} s C_{3k} \\ &\quad - \gamma s C_{4k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ \sigma_{xzk} &= [2ir_{1k} s C_{1k} e^{-r_{1k}x} - (\gamma s C_{2k} + i r_{2k} \gamma C_{3k} - (r_{2k}^2 \\ &\quad + s^2) C_{4k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ \sigma_{yzk} &= [-2\gamma s C_{1k} e^{-r_{1k}x} - (i r_{2k} s C_{2k} - i r_{2k} \gamma C_{4k} - (\gamma^2 \\ &\quad - s^2) C_{3k}) e^{-r_{2k}x}] e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}. \end{aligned} \quad (15):$$

$$\begin{aligned}\sigma_{yk} &= [(-2r_{1k}^2 + 2s^2 - \omega^2)C_{1k}e^{-r_{1k}x} - 2(ir_{2k}\gamma C_{2k} \\ &\quad + \gamma s C_{3k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ \sigma_{zk} &= [(-2r_{1k}^2 + 2s^2 - \omega^2)C_{1k}e^{-r_{1k}x} + 2(\gamma s C_{3k} \\ &\quad + ir_{2k}s C_{4k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ u_{yk} &= [-i\gamma C_{1k}e^{-r_{1k}x} + (r_{2k}C_{2k} - is C_{3k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))}, \\ u_{zk} &= [-is C_{1k}e^{-r_{1k}x} + (i\gamma C_{3k} - r_{2k}C_{4k})e^{-r_{2k}x}]e^{i(\omega t - (\gamma y + sz))},\end{aligned}$$

В этом случае $A_{jn}, A'_{jn}, \vec{B}_{jn}$ - произвольные постоянные величины. $H_n^{(1)}(\alpha_j r)$ и $H_n^{(2)}(\alpha_j r)$ -функции Ханкеля: $H_n^{(1),(2)}(\alpha r) = J_n(\alpha r) \pm iN_n(\alpha r)$.

Используя граничные условия (3) - (8) для нахождения произвольных констант, получаем систему неоднородных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами:

$$[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)]\{q\} = \{P_2\}. \quad (16)$$

Здесь $\{q\}$ - вектор-столбец, состоящий из произвольных констант; $\{P_2\}$ - вектор-столбец внешних падающих волн.

Система алгебраических уравнений (16) с комплексными коэффициентами решается с помощью алгоритма, разработанного в диссертации, методом последовательного исключения переменных Гаусса.

Если внешнее воздействие отсутствует, то получаем однородную систему алгебраических уравнений. Из условия существования нетривиального решения этой системы выводится следующее дисперсионное уравнение:

$$\det[R(k, \omega)] = 0. \quad (17):$$

Уравнение (17) решается методом Мюллера.

Для решения поставленной задачи при нагружении неустановившихся волн на многослойную пластинку применяется интегральное преобразование Лапласа по времени: ($0 < t < T_1$),

$$f^L(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt = L[f(t)]. \quad (18):$$

Обратное преобразование осуществляется с помощью следующего интеграла:

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

Интеграл берется по пути, расположенному справа от особой точки.

В диссертационной работе для решения интегро-дифференциальных уравнений в частных производных механики деформируемого твердого тела использованы метод «замораживания», разделения переменных, Лапласа, Мюллера и Гаусса. На основе программного обеспечения Matlab получены численные результаты.

В третьей главе диссертации, озаглавленной «**Распространение волн в трёхслойной вязко-упругой пластинке с наполнителем**», рассмотрена задача распространения гармонических собственных волн в трёхслойной вязкоупругой пластинке с наполнителем. Рассмотрим пластинку, у которой нейтральная плоскость совпадает с плоскостью Oxz , а координата y

направлена вдоль толщины. Пусть вдоль оси z распространяются гармонические волны изгиба пластины (рис. 2).

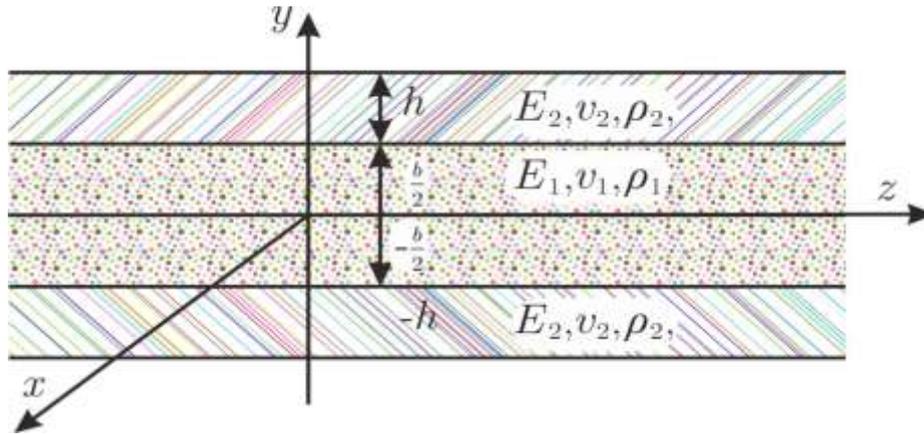


Рис. 2. Расчетная схема трехслойной бесконечно длинной пластины

Основной материал пластинки занимает область $-b/2 \leq y \leq b/2$, толщина каждой из которых всюду одинакова $b/2$, а покрытие занимает область $(-h+b/2 \leq y \leq -h; h \leq y \leq b/2+h)$. Пусть E, ν, ρ представляют собой модуль объемного сжатия основного слоя, коэффициент Пуассона при сдвиге и плотность материала соответственно. Тогда решение задачи Рэлея-Лэмба для основного слоя получается методом разделения переменных, и при распространении гармонической волны с частотой ω , волновым числом k , перемещения u, v, w (в направлении осей x, y и z соответственно) имеют вид:

$$u = 0; v = (\alpha A_1 \operatorname{ch} \alpha x_2 - k C_1 \operatorname{sh} \beta x_2) e^{i(\omega t - kz)},$$

$$w = (-ik A_1 \operatorname{ch} \alpha y + i \beta C_1 \operatorname{sh} \alpha y) e^{i(\omega t - kz)},$$

для области $-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$, здесь A_1 и C_1 - постоянные величины, и:

$$\alpha^2 = k^2 - \frac{\omega^2 \rho}{\lambda G + \frac{4}{3} \mu}; \quad \beta^2 = k^2 - \frac{\omega^2 \rho}{\mu}. \quad (19):$$

Согласно взаимосвязи между напряжениями и деформациями из линейной теории упругости для изотропного материала:

$$\sigma_{xz} = (G - 2/3\mu) A_1 (\alpha^2 - k^2) \operatorname{sh} \alpha y;$$

$$\sigma_{yy} = A_1 [(G - 2/3\mu) (\alpha^2 - k^2) + 2\mu \alpha^2] \operatorname{sh} \alpha y - 2\mu k \beta C_1 \operatorname{sh} \beta y;$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xx} = 0; \sigma_{yz} = -2\mu i k A_1 \alpha \operatorname{ch} \alpha y + i \mu C_1 (k^2 + \beta^2) \operatorname{ch} \beta y;$$

$$\sigma_{yy} = A_1 [(G + 2/3\mu) (\alpha^2 - k^2) + 2\mu \alpha^2] \operatorname{sh} \alpha y + 2\mu k \beta C_1 \operatorname{sh} \beta y.$$

Для перемещений точек верхнего внешнего слоя, удовлетворяющих уравнениям движения, выражения в общем виде имеют вид:

$$u = 0;$$

$$v = -\alpha c [\beta_1 \operatorname{sh} \alpha_e (y - H) + F_1 \operatorname{ch} \alpha_e (y - H)] + k [D_1 \operatorname{ch} \beta_c (y - H) + M_1 \operatorname{sh} \beta_c (y - H)]$$

$$w = ik [\beta_1 \operatorname{ch} \alpha_e (y - H) + F_1 \operatorname{sh} \alpha_e (y - H)] - i \beta_c [D_1 \operatorname{sh} \beta_c (y - H) + M_1 \operatorname{ch} \beta_c (y - H)].$$

Здесь, β_1 , D_1 , F_1 , M_1 - постоянные, а параметры α_c и β_c определяются из соотношений, аналогичных (19), следующим образом:

$$\alpha_c^2 = k^2 - \frac{\omega^2 \rho_c}{G_e + \frac{4}{3} \mu_c}; \quad \beta_c^2 = k^2 - \frac{\omega^2 \rho_c}{\mu_c}.$$

Индекс c относится к характеристикам материала покрытия. Используя свойство антисимметричности изгибающей волны для области: $-H = -(b_1 + b/2) \leq y \leq h$, можно получить аналогичные семейства зависимостей

$$U(y) = u(-y); \quad v(y) = v(-y); \quad w(y) = -w(-y). \quad (20):$$

Учитывая свойства решения (20), в дальнейшем ограничимся рассмотрением области $0 \leq u \leq N$. На границе свободной поверхности $y=H$ должны выполняться следующие краевые условия:

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yy} = \sigma_{yz} = 0. \quad (21):$$

Кроме того, на контактной поверхности $y = b$ должно соблюдаться условия непрерывности перемещений:

$$u(b^-) = u(b^+); \quad v(b^-) = v(b^+), \quad w(b^-) = w(b^+) \quad (22):$$

и условие равенства:

$$\sigma_{xy}(b^-) = \sigma_{xy}(b^+); \quad \sigma_{yy}(b^-) = \sigma_{yy}(b^+); \quad \sigma_{yz}(b^-) = \sigma_{yz}(b^+). \quad (23):$$

Здесь должно выполняться условие ($b=b/2$). На основе условий (21), (22), (23) и по условию симметричности получаем систему из шести однородных линейных алгебраических уравнений относительно шести констант (A_1 , B_1 , C_1 , D_1 , F_1 и M_1): $[S]\{q\}=\{0\}$.

Чтобы система уравнений имела нетривиальное решение, определитель матрицы, составленной из коэффициентов системы, должен быть равен нулю:

$$F(\Omega) = [C] = 0. \quad (24):$$

Здесь:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \alpha_c h \alpha_c k; \quad C_{12} = -k c h \beta_c k; \quad C_{13} = \alpha_c \text{sh} \alpha_c (b - H); \\ C_{14} &= \alpha_c c h \alpha_c (b - H); \quad C_{15} = k c h \beta_c (b - H); \quad C_{16} = -k \text{sh} \beta_c (b - H); \\ C_{21} &= -k \text{sh} \alpha_c b; \quad C_{22} = \beta_c \text{sh} \beta_c h; \quad C_{23} = -k c h \alpha_c (b - H); \\ C_{24} &= -k c h \alpha_c (b - H); \quad C_{25} = \beta_c \text{sh} \beta_c (b - H); \quad C_{26} = \beta_c \text{sh} \beta_c (b - H); \\ C_{31} &= \alpha_1 \text{sh} \alpha_c b; \quad C_{32} = -2 \mu_c k \beta_c \text{sh} \beta_c b; \quad C_{33} = -\alpha_2 c h \alpha_c (b - H); \\ C_{34} &= -\alpha_2 c h \alpha_c (b - H); \quad C_{35} = 2 \mu_c k \beta_c \text{sh} \beta_c (b - H); \\ &] \quad C_{41} = -2 \mu_c k \alpha_c c h \alpha_c h; \quad C_{42} = \mu_c \alpha_3 c h \beta_c h; \\ C_{43} &= -2 \mu_c k \alpha_c \text{sh} \alpha_c (b - H); \quad C_{44} = -2 \mu_c k \alpha_c c h \alpha_c (b - H); \\ C_{45} &= \mu_c \alpha_1 c h \beta_c (b - H); \quad C_{46} = \mu_c \alpha_1 \text{sh} \beta_c (b - H); \\ C_{51} &= C_{52} = C_{54} = C_{55} = 0; \quad C_{53} = -\alpha_3; \quad C_{56} = -2 \mu_c k \beta_c; \\ C_{61} &= C_{62} = C_{63} = C_{66} = 0; \quad C_{64} = -2 \mu_c k \alpha_c; \quad C_{65} = \mu_c \alpha_c. \\ \alpha_1 &= G(k^2 - \alpha^2) - \frac{2}{3} \mu (k^2 + \alpha^2); \quad \alpha_2 = k^2 + \alpha^2; \end{aligned}$$

$$\alpha_3 = G(k^2 - \alpha_c^2) - \frac{2}{3}\mu_c(k^2 + 2\alpha_c^2); \quad \alpha_4 = k^2 + \beta_c^2,$$

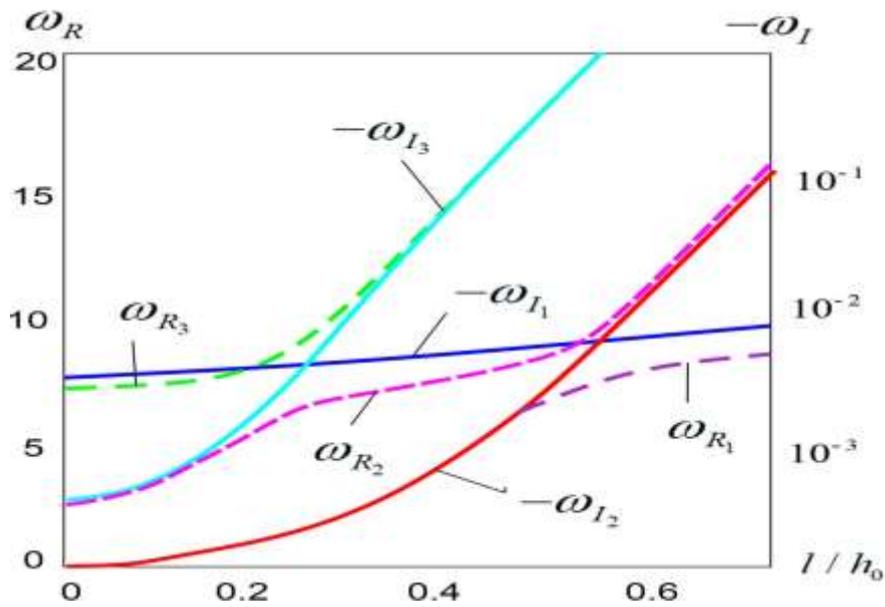


Рис. 3. Зависимость действительной и мнимой частей частоты от толщины

Трансцендентное уравнение (21) численно решается методом Мюллера. Во всех случаях коэффициенты Пуассона для среднего слоя и покрытия принимаются соответственно равными 0,30 и 0,25; $C_{pc} = 5400 \text{ m/s}$; $C_{sc} = 3195 \text{ m/s}$; $C_{lpc} = 2300 \text{ m/s}$; $C_{spk} = 2300 \text{ m/s}$; $\nu_c = 0.30$; $\nu_{pk} = 35$; $h/b = 0.1$, $\rho_{cp} = \frac{\rho_{pk}}{\rho_c} = 0.4452$ (отношение плотности покрытия к плотности среднего слоя).

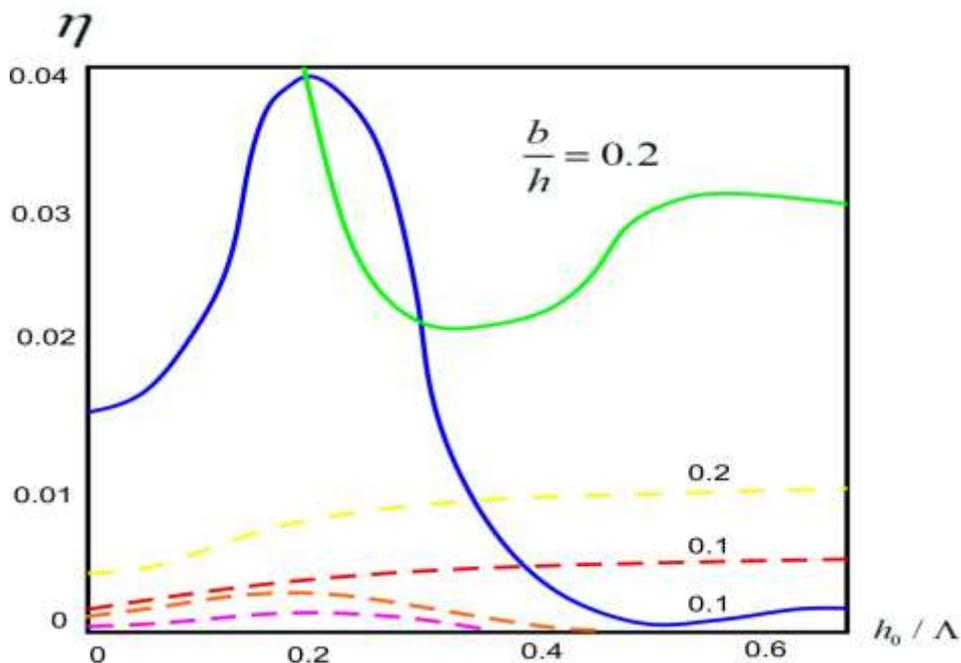


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания от длины волны

Реологические свойства покрытия: $A = 0,048$; $\beta = 0,05$; $\alpha = 0,1$. Приведённые значения соответствуют среднему слою, изготовленному из дюралея, и покрытию из акрила. Покрытие (пластинки) -упругое, заполнитель- вязкоупругий, т. е. конструкция диссипативно- неоднородная.

Результаты представлены графически в виде изменения действительной части частоты и коэффициента потерь по отношению к безразмерному волновому числу (отношение полутолщины среднего слоя к длине волны). Абсолютная погрешность собственных значений в расчетах составляла около $14 \cdot 10^{-6}$. Изменение действительной и мнимой частей частоты в зависимости от толщины пластинки показано на рис. 3. На рис. 4 показано изменение коэффициента затухания в зависимости от длины волны. В случае диссипативно- неоднородных механических систем найдена немотонная зависимость коэффициента демпфирования от длины волны. Здесь функцию глобального коэффициента демпфирования (ГКД) выполняют мнимые части первой и второй собственных частот. При сближении действительных частей этих частот наблюдается пересечение мнимых частей первой и второй мод собственных частот.

Во всех случаях коэффициент Пуассона срединного слоя (рис. 2) принят равным 0,25, отношение плотности материала слоя и срединного слоя ρ_c/ρ равно 0,35, отношение модуля объемного сжатия материала слоя к модулю сдвига материала срединного слоя G_c/μ равно 0,20. Отношение модулей сдвига слоя и среднего слоя принято равным 0,11 (1+i), где - коэффициент, учитывающий рассеяние энергии при сдвиговых деформациях, возникающих в процессе колебаний. Приведенные значения соответствуют системе, состоящей из эластичного алюминиевого срединного слоя и слоя из высокополимерного материала.

Рассмотрено отношение толщины слоя к половине толщины среднего слоя h/b при различных значениях и коэффициента затухания энергии γ в материале при различных значениях деформаций сдвига. Результаты представлены в виде графиков зависимости $\Omega_{(\omega^2)}$ действительной части и коэффициента затухания $h/x = kh/2\pi$ от безразмерного волнового числа (отношение полутолщины среднего слоя к длине волны). Абсолютная погрешность вычислений собственных значений по точным уравнениям находится в пределах $14 \cdot 10^{-6}$. На рис. 3 и 4 показано изменение действительной и мнимой частей комплексной частоты в зависимости от безразмерной длины волны. При $\gamma = 0,35$ относительная толщина слоя равна $h/b = 1$. Установлена немонотонная зависимость коэффициента затухания от длины волны для диссипативно- неоднородных механических системах.

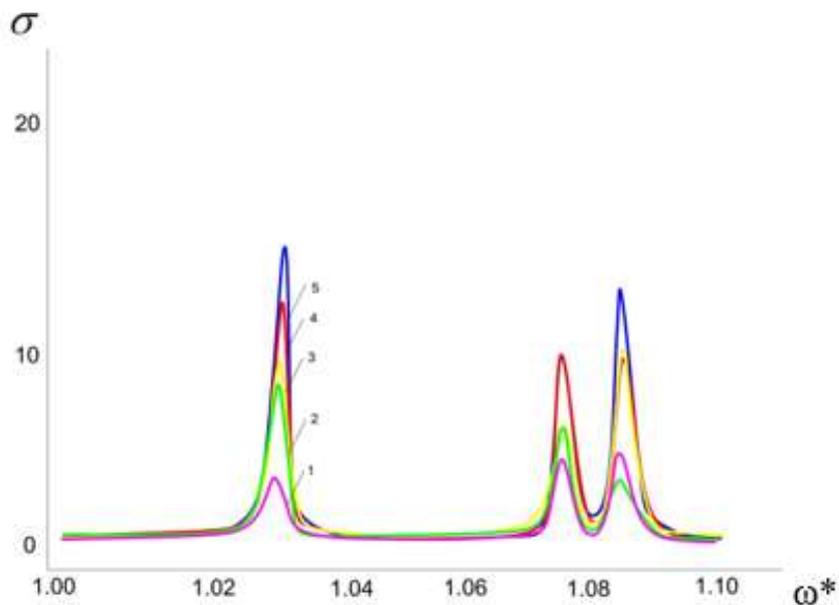
Построены графики дисперсионных кривых, а также рассмотрены проекции параметров k и β для различных значений, представляющих наследственные свойства материала, как для положительной, так и для

отрицательной действительной части k^* в плоскости (ω^*, α) . Анализ численных решений показал, что чем больше m или чем меньше значение β , тем раньше и больше начинают удаляться дисперсионные кривые k^* , имеющие положительную и отрицательную мнимую части. При уменьшении значения m или увеличении значения β дисперсионные кривые стремятся к упругому состоянию. Кроме того, установлено, что дисперсионные кривые наследственно-упругого спектра, относящиеся к упругому спектру, представляют собой комплексное число k^* с отрицательными мнимыми частями, которое определяет затухание решения по координате. На рис. 3 и 4 приведены изменения коэффициента затухания в зависимости от длины волны (для диссипативно- неоднородной механической системы). Следует отметить, что для наследственно-упругого спектра понятия "частота запираания" (так как $k^* = 0$, $\omega^* > 0$ не являются корнями дисперсионного уравнения), а также "минимум частоты" (при движении ω^* по сети монотонно возрастает) теряют смысл. Анализ численных результатов показывает, что в сети упругого спектра наибольшей кривизной обладают сети наследственно-упругого спектра, в окрестности частот перекрытия и минимумов частот. Увеличение значений m , а также уменьшение значений β приводит к сглаживанию дисперсионных кривых в этих областях. Таким образом, упругий спектр можно приближенно считать асимптотическим для наследственно-упругого спектра при $m \rightarrow 0, \beta \gg 1$.

В четвертой главе диссертации "**Динамическое напряженно-деформированное состояние вязкоупругих трехслойных пластин под действием гармонических нагрузок**" исследовано динамическое напряженно-деформированное состояние (ДН-ДС), возникающее в многослойной системе пластин под действием гармонических нагрузок. На основе результатов, полученных в третьей главе для диссипативно-неоднородных механических систем для уменьшения (оптимизации) ДН-ДС, найдены новые грани решения задачи. Рассмотрим ДН-ДС диссипативной механической системы, состоящей из слоев, находящихся в состоянии плоской деформации под действием внешних гармонических сил в системе координат Oxz . Предположим, что выполнены условия жесткого закрепления между слоями. Тогда граничные условия будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{33}^1(x, 0, t) &= -p(x)e^{-i\omega t}, \sigma_{13}^1(x, 0, t) = 0, \\ \sigma_{33}^k(x, h_k, t) &= \sigma_{33}^{k+1}(x, h_k, t), \sigma_{13}^k(x, h_k, t) = \sigma_{13}^{k+1}(x, h_k, t), \\ u_k(x, h_k, t) &= u_{k+1}(x, h_k, t), \vartheta_k(x, h_k, t) = \vartheta_{k+1}(x, h_k, t), k = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (25):$$

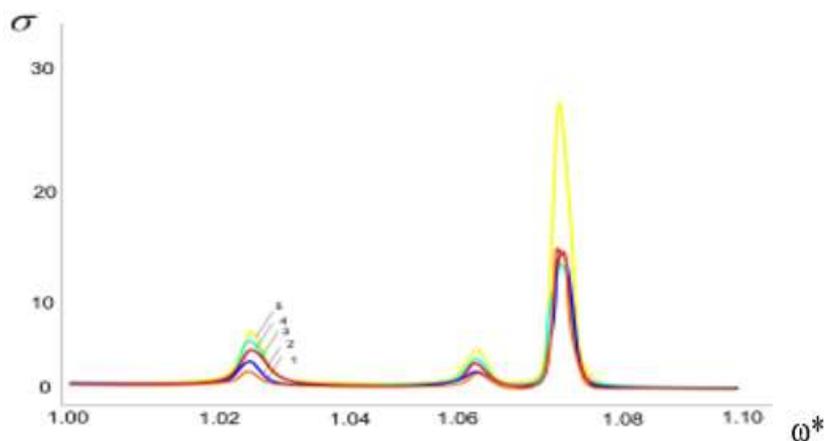
Здесь ω — величина, принимающая только действительные значения, а k — порядковый номер слоя.



**Рис. 5. Зависимость амплитуды напряжения от частоты
(диссипативно- однородная система)**

1. $E_2/E_1 = 0.15$; $h_2/h_1 = 3.0$; 2. $E_2/E_1 = 0.25$; $h_2/h_1 = 2.25$;
3. $E_2/E_1 = 0.35$; $h_2/h_1 = 2.15$; 4. $E_2/E_1 = 0.45$; $h_2/h_1 = 1.5$;
5. $E_2/E_1 = 0.5$; $h_2/h_1 = 1.5$; 6. $E_2/E_1 = 0.60$; $h_2/h_1 = 0.7$

Численные результаты получены для трехслойной пластины. В первом случае рассмотрена диссипативно- однородная механическая система. В этом случае все слои вязкоупругие. Амплитуды ядер релаксации, выражающие вязкость слоев, отличаются друг от друга. Остальные параметры (α, β) одинаковы для всех слоев. Ф.Б. Бадалов показал, что влияние этих других параметров на перемещения и напряжения не превышает 5-10%. Эта система уравнений решается методом Гаусса. Физико-механические характеристики верхней и нижней пластин ($\rho_{\text{qatlam}}/\rho_{\text{pol}} = 1.333$; $\nu_1 = 0.35$; $\nu_2 = 0.25$; $A = 0,048$; $\beta = 0,05$; $\gamma = 0.1$; $\alpha = 0,1$) приняты одинаковыми.



**Рис.6. Зависимость амплитуды напряжения от частоты
(диссипативно-неоднородная система)**

1. $E_2/E_1 = 0.15$; $h_2/h_1 = 3.0$; 2. $E_2/E_1 = 0.25$; $h_2/h_1 = 2.25$;

3. $E_2/E_1 = 0.35$; $h_2/h_1 = 2.15$; 4. $E_2/E_1 = 0.45$; $h_2/h_1 = 1.5$;
 5. $E_2/E_1 = 0.5$; $h_2/h_1 = 1.5$; 6. $E_2/E_1 = 0.60$; $h_2/h_1 = 0.7$

Численные результаты, полученные для диссипативно- однородной механической системы, представлены на рисунке 6. Исследована зависимость амплитуды напряжения $|A_{\sigma_{33k}}|$ ($|A_{\sigma_{33k}}| = |\sigma_{33}(x, z)/\sigma_{33}^p(x, 0)|$), характеризующей динамическое напряженно-деформированное состояние (ДН-ДС) механической системы в точке с координатами $z = h = 1, x = 0$ под воздействием внешней гармонической нагрузки, от частоты. Для полного гашения резонансной амплитуды механической системы использовалось понятие глобальная резонансная амплитуда (ГРА), введенная Сафаровым-Трояновским:

$$\delta_{\sigma_{33k}} = \max_y(|A_{\sigma_{33k}}|). \quad (26):$$

В диссипативно-однородной механической системе в роли глобальной резонансной амплитуды (ГРА) выступает резонансная амплитуда, соответствующая первой частоте. Зависимость амплитуды напряжения от частоты для диссипативно- неоднородной системы представлена на рисунке 6.

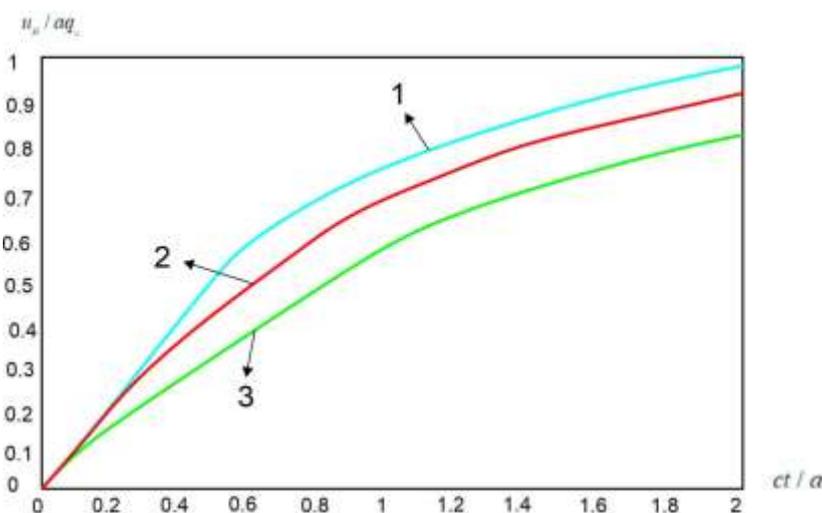


Рис. 7. Зависимость вертикального смещения от времени (1. Точка в центре полуплоскости кривой 1.(0,0); 2. (0,35l,0); 3. (0,45 l,0);

Найдем ДН-ДС, возникающую в полуплоскости под действием нестационарной силы. К уравнению Ламе применяется преобразование Грина-Лэмба и получаются волновые уравнения. Полученное уравнение решается применением преобразования Лапласа по времени и преобразования Фурье по координате. Изменение вертикального перемещения (u_y/a) (в точке $y=1$) в зависимости от безразмерного времени ($c_s t/a$) показано на рисунке 7. Результаты получены для случая приложения нагрузки в виде функции Хевисайда к упругому слою, лежащему в полуплоскости. Результаты получены для точек 1. А (0,0); 2. Б (0.35l,0); 3. С (0.45l,0)). Как видно из рисунка, перемещения со временем стремятся к асимптотике.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны методика и алгоритм решения задачи распространения собственной волны в трехслойной пластинке с вязкоупругим наполнителем (при выполнении различных условий контакта между слоями) с учетом вязкостных свойств материалов. Разработанная методика основана на метод специальных функций математической физики, методах Мюллера и Гаусса, интегральных преобразованиях Фурье и Лапласа, методах потенциальных функций Грина-Лэмба.

2. Разработана математическая постановка, методика и алгоритм решения задачи распространения волны под действием внешней нагрузки для многослойных вязкоупругих пластин с учетом вязкостных свойств материала при выполнении различных условий контакта между слоями.

3. Разработаны методика и алгоритм решения задачи уменьшения (в несколько раз) резонансной амплитуды перемещений и напряжений, возникающих в механической системе под действием внешних гармонических сил.

4. Для изучения резонансной амплитуды было использовано понятие глобальной резонансной амплитуды (ГРА), и ее физическая сущность была обоснована с помощью численного эксперимента. Было обнаружено, что диссипация энергии интенсивна в точке смены ролей (РА). В этой точке глобальный коэффициент затухания (ГКЗ) достигает максимума, а глобальная резонансная амплитуда (ГРА) - минимума.

5. Установлено, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) диссипативной механической системы на 20%-30% больше в области с малым волновым числом ($\gamma h < 0.2$), чем в области с большим волновым числом ($\gamma h > 1$).

6. Установлено, что результаты, полученные для собственных колебаний и вынужденных колебаний диссипативно- однородных и неоднородных цилиндрических механических систем, дополняют друг друга. Диссипативная механическая система может оцениваться через глобальную резонансную амплитуду (ГРА) амплитуды вынужденных колебаний, и обнаружено, что для диссипативно- неоднородной механической системы она изменяется немонотонно.

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

BUKHARA STATE TECHNICAL UNIVERSITY

NARZULLOYEV MUKHAMMAD AZAMATOVICH

**VIBRATION AND WAVE PROPAGATION OF THREE-LAYER PLATES
WITH A VISCO-ELASTIC FILER**

01.02.04 - Mechanics of a deformable solid

**DISSERTATION ABSTRACT
for scientific degree Doctor of Philosophy (PhD) in technical 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 B2025.4.PhD/T1073

The dissertation has been prepared at the Bukhara State Technical University.

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

Scientific adviser: **Teshaev Muhsin Khudoyberdiyevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Professor

Official Opponents: **Ismayilov Kubaymurad**
Doctor of technical Sciences. Professor

Yuldashev Sharofiddin Sayfiddinovich
Doctor of technical Sciences. Professor

Lead organization: **Tashkent State Transport University**

The defense of the thesis will take place on 11 november 2024 at 10:00 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 No. 480.). (Address: Bukhara region, 200100, Bukhara, K. Murtazaev st., 15. Phone: (+99895) 604-44-70).

Abstract of dissertation sent out on 25 october 2025 year
(mailing report № 1 on 13 september 2025 year)



I.I. Safarov

Chairman of the One-time Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

R.A. Sabirova

Academic Secretary of the One-time Academic Council for the Award of Academic Degrees, PhD in Physical and Mathematical Sciences

Z.I. Boltayev

Chairman of the One-time Scientific Seminar under the Scientific Council for awarding academic degrees, (DSc) in Physics and Mathematics, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The purpose of the research is to develop a methodology and algorithm for studying the propagation of natural and stimulated waves (determining the complex frequency, phase velocity, wave number and shape of oscillations, constructing the amplitude-frequency characteristic of displacement) taking into account the viscoelastic properties of a three-layer plate with filler, as well as to obtain numerical results and analyze them.

Research objectives:

development of a mathematical formulation, methodology and algorithm for solving the problems of wave propagation in a three-layer plate with a filler, taking into account the viscoelastic properties of materials;

development of a mathematical formulation, methodology, and algorithm for solving the problems of wave propagation in a three-layer plate with a filler interacting with a deformable medium, taking into account the viscoelastic properties of materials;

comparative assessment of the change in the complex frequencies of a three-layer plate with filler depending on the wave number and the stiffness of the filler;

study of the amplitudes of displacements and stresses of the medium during the propagation of a forced wave in a three-layer viscoelastic plate with a filler depending on the change in the stiffness of the filler and comparison with the results of existing experiments.

The object of the research is a three-layer plate with a filler with viscoelastic properties.

Implementation of research results. Based on the obtained results on the methods and algorithm for calculating the dynamic stress-strain state of wave propagation and oscillation problems in a three-layer plate with a filler;

the developed dispersion relationships describing the propagation of the characteristic wave in three-layer plates with a viscoelastic filler were used in the fundamental project OT-F4-01 "Development of methods for studying the nonlinear dynamic stress-strain state of curvilinear sections of multilayer composite pipes flowing with a viscous liquid under the influence of temperature and dynamic loads and development of the theory," carried out within the framework of the State Scientific and Technical Program of the Tashkent Chemical-Technological Institute (certificate of the Tashkent Chemical-Technological Institute No. 1/01-2410 dated July 8, 2025). As a result, the possibility of controlling energy in multilayer composite pipelines flowing viscous fluid under the influence of dynamic loads has been created;

The method of reducing the resonant amplitudes of displacements and stresses of the mechanical system under the influence of external forces was used to reduce the amplitude of resonant displacements of mechanisms in the organization "Amu-Bukhara Machine Canal Operation Department" (Reference No. 4214 of the Ministry of Water Resources of the Republic of Uzbekistan dated July 30, 2025). As a result, it was possible to reduce the resonance amplitude of the NDS (D6300-80) pump by up to 27%.

Publication of research results. A total of 20 scientific articles 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 publications.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 105 pages.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Narzulloyev M.A. Propagation of oscillations and change in phase velocity of a three-layer rod. "Galaxy international interdisciplinary research journal". (GIIRJ) ISSN (E): 2347-6915. – 2025. – Vol. 13. Issue 5. – P. 32-37 (IF=8.548) <https://internationaljournals.co.in/index.php/giirj/article/view/6318>
2. Narzulloyev M.A. Flexural vibrations of a double-layer elastic plate. "American journal of technology and applied sciences" ISSN (E): 2832. – 2025. – Volume 36. P. – 13-20 (IF=7.841) <https://americanjournal.org/index.php/ajtas/article/view/2922>
3. Jalolov F.B, Homidov F.F, Narzulloyev M.A, Yuldasheva O.O. Собственные колебания продольно-подкрепленных цилиндрических оболочек с упругим наполнителем. "Fan va texnologiyalar taraqqiyoti Ilmiy – texnikaviy jurnal". – Buxoro. – 2024. – № 6. – 4-10 b. (05.00.00, №24)
4. Teshayev M.X, Narzulloyev M.A, Qulmuratov N.R. Гашение вибраций вязкоупругой балки с присоединенными динамическими гасителями колебаний. "Fan va texnologiyalar taraqqiyoti. Ilmiy–texnikaviy jurnal". – Buxoro. – 2024. – № 3. – 17-23-b. (05.00.00, №24)

II bo'lim (II часть; part II)

5. Murodov O, Karimov I, Safarov I.I, Jalolov F.B, Narzulloyev M.A. Introduction of bodies of rotation into a half-space in a state of complete plasticity. AIP Conf. Proc. 3268, 020026 FEBRUARY-24. – 2025. <https://doi.org/10.1063/5.0260555>
6. Teshayev M.X, Jalolov F.B, Narzulloyev M.A. Osilgan massali bo'lgan Timoshenko gipotezasiga bo'ysinuvchi to'rtburchakli ortotrop qovushqoq- elastik plastinkaning tebranishlarining tenglamalari. "Buxoro Davlat Universiteti ilmiy axboroti". – Buxoro. – 2024. – №4. – 30-36 b.(01.00.00, №3)
7. Teshayev M.X, Homidov F.F, Jalolov F.B, Narzulloyev M.A. Yig'ilgan massali qovushqoq-elastik plastinkaning xos tebranishlari. "Buxoro Davlat Universiteti ilmiy axboroti". – Buxoro. – 2024. №9. – 75-81 b. (01.00.00, №3)
8. Boltayev Z.I, Narzulloyev M.A, Hojiyev A.O. Воздействию гармонических волн на многослойное подкреплённое отверстие с жидкостью «Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. Сборник докладов международной научно-технической конференции». Част 2. – Бухара. – 2024. – С. 49-54
9. Teshayev M.X, Jalolov F.B, Narzulloyev M.A. Стационарное напряженно-деформированное состояние трехслойной вязкоупругой цилиндрической оболочки при нормальном нагружении. «Actual problems of fundamental and applied research: Achievement and innovate solutions». – Bukhara. – 2024. – P. 154-159.

10. .Ахмедов М.Ш, Елибоев Н, Жалолов Ф.Б, Нарзуллаев М.А, Ергашова Н.Ш. Определение гидродинамического давления на оболочку, вызванного потоком жидкости. «Қурилишда инновациялар, бинолар ва иншоотларнинг сейсмик хавфсизлиги Халқаро микёсидаги илмий ва илмий-техник конференция». – Наманган. – 2024. –С. 115-118
11. Tshaev M.X, Homidov F.F, Jalolov F.B, Narzulloyev M.A. Erkinlik darajasi chekli bo'lgan qovushqoq elastik mexanik sistemaning erkin tebranishlari. “Механиканинг муаммоларини yechishda inavatsion yechimlari va istiqbollari mavzusidagi ilmiy amaliy Anjuman”. – Buxoro. – 2024. – 789-792 b.
12. Axmedov M.Sh, Narzulloyev M.A, Jumayeva X.X. Воздействию нестационарных волн на цилиндрической оболочке. “Механиканинг муаммоларини yechishda inavatsion yechimlari va istiqbollari mavzusidagi ilmiy amaliy Anjuman”. – Buxoro. – 2024. – 795-798 b.
13. Boltayev Z.I, Axmedov M.Sh, Narzulloyev M.A. Применение метода конечных элементов для решения задачи механики деформируемой твердого тела. “Механиканинг муаммоларини yechishda inavatsion yechimlari va istiqbollari mavzusidagi ilmiy amaliy Anjuman”. – Buxoro. – 2024. – 814-816 b.
14. Teshayev M.X, Narzulloyev M.A, Jalolov F.B. Дифференциальные уравнения относительного движения механических сервосистем. “Yangi O'zbekistonda ilm fanning eng so'ngi yutuqlari. Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari to'plami”. – Buxoro – 2023. – 170-173 b.
15. Tshaev M.X, Homidov F.F, Mirzoeva G.T, Narzulloyev M.A. О вибрационных колебаниях диссипативно неоднородных механических систем «Актуальные проблемы современной геометрии и топологии Материалы конференции». – Ташкент. – 2024 С. 234-235.
16. Teshayev M.X, Jalolov F.B, Narzulloyev M.A, Ibragimova D.A. Колебания сферических тел в вязкоупругой среде “Matematik fizikaning zamonaviy usullari va ularning tadbirlari. Akademik Sh.A.Alimov tavalludining 80 yilligiga yilligiga bag'ishlangan respublika ilmiy anjumani ma'ruzalar tezislari”. – Toshkent. – 2025. – 350-352- b.
17. Teshayev M.X, Narzulloyev M.A, Jalolov. F.B, Homidov F.F. Колебания вязкоупругих пластин имеющих сосредоточенные массы. “Механика va matematikaning amaliy muammolari Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari”. – Toshkent. – 2024. – 68-70 b.
18. Kuldashov N. U, Narzulloyev M.A, Umarov A.O. Axmedov M.Sh, Колебания тонких цилиндрических оболочек с идеальной жидкости. “Механика va matematikaning amaliy muammolari. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari”. – Toshkent. – 2024. – 76-79 b.
19. Narzulloyev M.A. Erkinlik darajasi chekli bo'lgan qovushqoq-elastik mexanik sistemaning erkin tebranishlari. “Механика va matematikaning amaliy muammolari Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari”. – Toshkent. – 2024. – 122-128 b.
20. Шодиев З.О, Сайфуллаев С.С, Нарзуллаев М.А, усовершенствование составных частей сушильного агрегата для сушки хлопка-сырца. « OLIMP научный центр Дритп сборник материалов. Международной научно-практической конференции, Theory and practice of scientific research». – Москва – 2019. – С 25 28.

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

Bosishga ruxsat etildi: 24.10.2025 Bichimi: 60x84 1/16.
“Times New Roman” garniturada raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i: 3. Adadi 100. Buyurtma №305.
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

