

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

TOSHKENT KIMYO-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

CHORIYEV MIRJALOL

**QOVUSHOQ-ELASTIK KO'P QATLAMLI SILINDRIK QOBIQQA
GARMONIK VA TURG'UN BO'LMAGAN TO'LQIN DIFRAKSIYASI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

Fizika -matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (Doctor of Philosophy) dissertasiyasi

AVTOREFERATI

BUXORO–2025

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

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

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on Physical
and Mathematical Sciences**

Choriyev Mirjalol

Qovushoq-elastik ko'p qatlamli silindrik qobiqqa garmonik va turg'un
bo'lmagan to'liq difraksiyasi 3

Чориев Миржалол

Дифракция гармонических и нестационарных волн на многослойной
вязкоупругой цилиндрической оболочке..... 21

Choriev Mirjalol

Diffraction of harmonic and nonstationary waves by a multilayer
viscoelastic cylindrical shell..... 41

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

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**

TOSHKENT KIMYO-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

CHORIYEV MIRJALOL

**QOVUSHOQ-ELASTIK KO'P QATLAMLI SILINDRIK QOBIQQA
GARMONIK VA TURG'UN BO'LMAGAN TO'LQIN DIFRAKSIYASI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

Fizika -matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (Doctor of Philosophy) dissertasiyasi

AVTOREFERATI

BUXORO –2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.4.PhD/FM964 raqam bilan ro'yxatga olingan.

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

Ilmiy rahbar:

Safarov Ismoil Ibrohimovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Ibraxim Mirzayev
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Ismayilov Kubaymurat
texnika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Namangan davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Buxoro davlat texnika universiteti huzuridagi PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 raqamli ilmiy kengashning 2025-yil "4" oktabr soat 11:³⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 200100, Buxoro shahar, Q.Murtazoyev ko'chasi, 15. Tel.: (+99865) 223-78-84; faks: (+99865) 223-79-72, e-mail: bstu_info@edu.uz).

Dissertatsiya bilan Buxoro davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№471 raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: (200100, Buxoro shahri, Q.Murtazoyev ko'chasi, 15. Tel.: (+99895) 604-44-70).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil 20 sentabr kuni tarqatildi.

(2025-yil 9 avgust dagi №4 raqamli reyestr bayonnomasi).



M.X. Teshayev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d. (DSc)

R.A. Sabirova
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi, f.-m.f.b.f.d. (PhD)

Z.I. Boltayev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d. (DSc) prof.

KIRISH (falsafa doktori(PhD) dissertatsiyasasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahondagi eng dolzarb muammolardan biri — seysmik faol hududlarda barpo etilayotgan yer osti inshootlarining zilzilaga chidamliligini ta'minlash bo'yicha zamonaviy texnika va texnologiyalarni qo'llash muammosi yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida portlash va seysmik to'lqinlar ta'sirida yuzaga keladigan yer osti inshootlarida kuchlanish va deformatsiyalarni, shuningdek, to'lqinlarning difraksiyasini o'rganishga hamda amaliyotga joriy etishni taqozo etadi. Shu jihatdan zamonaviy yer osti inshootlarining ko'plab tarkibiy elementlariga dinamik yuklanishlar ta'sirida yuzaga keladigan rezonans hodisalarining oldini olish texnik vositalar hamda zamonaviy dasturlaridan foydalanish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda, xususan, AQSh, Germaniya, Rossiya, Xitoy kabi rivojlangan davlatlarda konstruksiyalarning mustahkamligi va ishonchliligini oshirish, shuningdek, to'lqin ta'sirini hisobga olgan holda zamonaviy matematik modellar va hisoblash usullari ishlab chiqishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, hozirgi vaqtda xalqaro miqyosdagi yer osti inshootlarida qo'llanilayotgan kompozitsion materiallarning murakkab reologik xususiyatlari, xususan, ularning dissipativ va bir jinsli bo'lmagan tabiati, shuningdek, deformatsiyalanuvchan muhit bilan o'zaro ta'sirini hisobga olgan holda yuzaga keladigan fizik-mexanik muammolarni hal qilishga qaratilgan zamonaviy ilmiy-uslubiy yondashuvlar va hisoblash dasturlari ishlab chiqishga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda ham qurilish sohasi keng rivojlanib bormoqda. Xususan, yer osti inshootlari va kommunikatsiya tizimlarining turli dinamik yuklamalar ostida ishonchli ishlashini ta'minlovchi texnika va texnologiyalarni ishlab chiqish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. Shu sababli, mahalliy sharoitlarni hisobga olgan holda, to'lqin ta'sirini o'rganish va zamonaviy ilmiy yondashuvlarni ishlab chiqish katta amaliy ahamiyatga ega. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 30-maydagi PF-144-sonli "O'zbekiston Respublikasi seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"¹ gi Farmoni bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, mazkur tadqiqot yo'nalishida ishlab chiqilgan algoritmlar va dasturlarni yaratish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-maydagi PQ-158-sonli "O'zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini yanada takomillashtirishga oid qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"² gi qarori, 2024-yil 17-apreldagi PQ-161-sonli "Bino va inshootlarning zilzilaga

¹O'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

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

bardoshlilikini oshirish hamda seysmik xavfni monitoring qilish faoliyatini takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"³gi qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi fan va texnikasini rivojlantirishning IV. "Matematika, mexanika, inshootlarning seysmik dinamikasi va informatika" yo'nalishi doirasida amalga oshirildi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi.

Ko'p qatlamli silindrik qobiqning seysmik to'lqin ta'siridagi masalalari taniqli xorijiy olimlar, jumladan, Ilyushin A.A., Shemyakin Ye.I., Uayt, Axenbax J.D., Troyanovskiy I.Ye., Slepyan L.I., Fotiyeva N.N., Bulichev N.S. va boshqalar tomonidan ilmiy jihatdan o'rganilgan. Ushbu muammoni hal qilish masalasi bo'yicha O'zbekistonlik olimlar ham o'zlarining katta hissalarini qo'shishgan, jumladan: Urazbayev M.T., Shirinqulov T.Sh., Raxmatulin X.A., Kabulov V.K., Rashidov T.R., Muborakov Ya.N., Mardonov B.M., Sultanov K.S., Mamatqulov Sh.M., Mirsaidov M.M., Mirzayev I., Xojimetov G'X., Ishanxo'jayev A.A., Mavlonov T.M., Yuldashev Sh.S., Abdusattorov A.A., Safarov I.I., Xudaynazarov H.H., Teshayev M.X., Usarov M.K., Usmonov B.Sh. va boshqalar. Ular silindrik va sferik jismlarning dinamik xususiyatlarini baholashda materiallarning reologik xususiyatlarini inobatga olib, parametrlarni aniqlashning samarali usullarini ishlab chiqishgan.

Hozirgi vaqtda cheksiz elastik muhit bilan bog'liq bo'lgan dissipativ tizimlar dinamikasida bir qator muammolar mavjud bo'lib, ularning yechimi tebranishlar va to'lqin difraksiyasining yangi qonuniyatlarini ochishga imkon beradi. Ishonchli usullar va algoritmlarni yaratish dinamik mustahkamlik va barqarorlikning ko'plab muammolarini, xususan, mashinasozlik va yer osti inshootlarining qurilishida hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassaasining ilmiy - tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Mazkur dissertatsiya tadqiqoti Toshkent kimyo-texnologiya institutida 2015-2024 yillarga mo'ljallangan "Matematikaning ilmiy-amaliy muammolari" ilmiy-tadqiqot rejasining ilmiy-texnik dasturiga muvofiq amalga oshirildi.

Tadqiqotning maqsadi qovushqoq-elastik muhitda joylashgan ko'p qatlamli silindrik qobiqqa bo'ylama yoki ko'ndalang (garmonik yoki noturg'un) to'lqinlar yuklanish masalalarining matematik qo'yilishi, yechish metodikasi va algoritmlarini ishlab chiqishdan hamda sonli natijalar olib tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

bo'ylama (yoki ko'ndalang) to'lqinlar ta'siri ostida qovushqoq-elastik muhit bilan kontaktda bo'lgan ko'p qatlamli silindrik qobiqlarda hosil bo'ladigan

³O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 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 qarori

kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatlarini topish metodikasi va algoritmlarini ishlab chiqish;

garmonik to‘lqin ta’sirida qovushqoq-elastik muhitdagi ikki va uch qatlamli silindrik qobiqlarda hosil bo‘ladigan kuchlanganlik holatiga to‘lqin uzunligi va chastotaga bog‘liq baho berish;

nostatsionar to‘lqin ta’sirida qovushqoq-elastik muhitdagi ikki qatlamli silindrik qobiqlarda hosil bo‘ladigan kuchlanishlarni topish uchun Furye integral almashtirishi Romberg usullariga asoslangan algoritmlarini ishlab chiqish;

energiya dissipatsiyasini hisobga olgan holda, qovushqoq-elastik silindrik qobiqlarga garmonik va nostatsionar to‘lqinlar ta’sirida hosil bo‘ladigan kuchlanish va deformatsiya amplitudasini chastotaga bog‘liq holda o‘rganish hamda olingan natijalarni solishtirma baholash.

Tadqiqotning obyekti - qovushqoq-elastik muhitdagi ikki va uch qatlamli silindrik qobiqlar.

Tadqiqotning predmeti - uzun qovushqoq-elastik ikki (yoki uch) qatlamli silindrik qobiqqa bo‘ylama (yoki ko‘ndalang) statsionar bo‘lmagan to‘lqin yuklanganda silindrik qobiqda hosil bo‘ladigan kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini geometrik va fizik-mexanik parametrlarga bog‘liq holda baholash masalalari tadqiqotning predmetini tashkil etadi.

Tadqiqot usullari - Tadqiqotda matematik-fizik tenglamalardan foydalanilgan hamda integral shakl almashtirish usullari (Furye va Laplas), muzlatish usuli, Myuller usuli va Gauss usullari qo‘llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

qovushqoq-elastik muhitdagi silindrik jismda statsionar bo‘lmagan to‘lqin difraksiyasi jarayonida kuchlanish va deformatsiyalarning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi muhitning uch parametrli Rijanitsin–Koltunov yadrosi parametrlariga bog‘liq analitik formulasi Furye integral almashtirishiga asoslanib ilk marta olingan.

qatlam qalinligi kamayganda, nisbatan qattiq qatlamlar uchun kuchlanish konsentratsiyasining ortishi, yumshoq qatlamlar uchun esa ma’lum oraliqda kuchlanish konsentratsiyasining kamayishi aniqlangan.

garmonik to‘lqin ta’sirida qovushqoq-elastik muhitdagi ikki va uch qatlamli silindrik qobiqlarda hosil bo‘ladigan dinamik kuchlanish–deformatsiyalanish holati uzun to‘lqinlar va kichik chastotalarda (10 Gts gacha) o‘zining maksimal qiymatlariga erishuvi dispersion munosabatlardan topilgan.

qovushqoq-elastik silindrik qobiqlarda nostatsionar (impulsi) to‘lqinlar ta’sirida hosil bo‘ladigan dinamik kuchlanish va deformatsiyalar vaqtning boshlang‘ich davrida maksimal qiymatlarga erishib, keyinchalik statik kuchlanish va deformatsiyalarga asimptotik yaqinlashib borishi hamda ularning parametrlar bilan bog‘liq nomanoton o‘zgarish oraliqlari mavjudligi aniqlangan.**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

ikki va uch qatlamli silindrik qobiqlarda nostatsionar to‘lqinlar ta’sirida hosil bo‘ladigan kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini hisoblash algoritmi va dasturi ishlab chiqilgan;

ikki va uch qatlamli silindrik qobiqlarda garmonik to‘lqinlar ta’sirida hosil bo‘ladigan kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini hisoblash algoritmlari ishlab chiqilgan;

ikki va uch qatlamli silindrik qobiqlarda bo‘ylama va ko‘ndalang yuklanish natijasida yuzaga kelgan kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holati solishtirma baholangan. Olingan natijalar yer osti inshootlarining kuchlanganlik va deformatsiyalanganlik holatini kamaytirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi chegaraviy masalalarni to‘g‘ri shakllantirish, olingan matematik ifodalarning qat’iyligi, asosli yechish usullarini qo‘llash, yechimlarning to‘g‘riligini baholash va boshqa olimlar tomonidan olingan yechimlar bilan taqqoslash orqali asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Qovushqoq-elastik muhitdagi (dissipativ bir jinsli bo‘lmagan) ko‘p qatlamli silindrik qobiqlarda to‘lqin ta’sirida hosil bo‘ladigan difraktsiya jarayonini hamda dinamik kuchlanish va deformatsiyalar holatini topish uchun ishlab chiqilgan metodika va algoritmi deformatsiyalanuvchi qattiq jismning to‘lqin dinamikasi nazariyasining rivojlanishiga katta hissa qo‘shgan.

Natijalarning amaliy ahamiyati shundaki, yer osti inshootlariga seysmik to‘lqinlar ta’sir etganda ularning mustahkamligini materiallarning qovushqoqligini hisobga olish orqali hisoblash usullarini rivojlantirishga xizmat qilgan.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Tadqiqotdagi qovushqoq-elastik ko‘p qatlamli silindrik qobiqqa garmonik va turg‘un bo‘lmagan to‘lqinlar difraktsiyasi masalalarini yechish metodikasi va algoritmi asosida olingan natijalar asosida:

bir jinsli bo‘lmagan ko‘p qatlamli silindrik qobiqlarning dinamik kuchlanish–deformatsiya holatini solishtirma baholashga yo‘naltirilgan xususiy hosilali, kompleks koeffitsiyentli differensial tenglamalarni taqribiy yechish usullaridan O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutida bajarilgan IL-21071166-sonli “Shamolning past tezligi uchun mo‘ljallangan vertikal o‘qli shamol turbinasini yaratish” mavzusidagi innovatsion loyihada foydalanilgan (O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutining 2025-yil 24-yanvardagi 71-3-sonli ma’lumotnomasi). Natijada, shamol turbinalarining samarali ishlashini ta’minlash maqsadida tuzilgan matematik model tenglamalarining to‘g‘riligini tekshirish imkoniyati yaratilgan.

dissertatsiyada ishlab chiqilgan birinchi tartibli, bir jinsli bo‘lmagan xususiy hosilali differensial tenglamalarni yechish metodikasidan Toshkent kimyo-texnologiya institutida 2016–2020 yillarda 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 instituti, 2025-yil 6-fevral, 1/01-358-sonli ma’lumotnoma). Natijada, qovushqoq suyuqlik oquvchi, ko‘ndalang kesimi silindrik shakldagi kompozit quvurlarni dinamik yuklanishlar ta’sirida yuzaga keladigan kuchlanish–

deformatsiya holati aniqlanib, rezonans hodisasi sodir bo‘lishi mumkin bo‘lgan sohalarni oldindan bilish imkoniyati yaratilgan. **Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha 24 ta ilmiy ish chop qilingan. Ulardan 10 tasi ilmiy jurnallarda, 14 tasi esa ilmiy ishlar to‘plamlarida va turli anjuman materiallarida nashr qilingan.

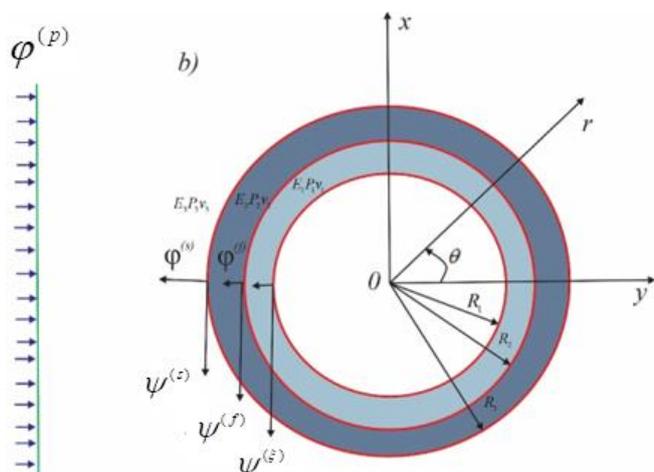
Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 114 betni tashkil qiladi.

DISSERTASIYANING ASOSIY MAZMUNI

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

Dissertatsiyaning **“Qovushqoq-elastik ko‘p qatlamli silindrik qobiqqa garmonik va nostatsionar to‘lqin difraksiyasi masalasiga bag‘ishlangan adabiyotlar tahlili”** deb nomlangan birinchi bobida, garmonik va noturg‘un to‘lqinlar ta‘sirida chuqur o‘rnatilgan silindrik (ko‘ndalang kesimi turlicha bo‘lgan) quvurlarning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini o‘rganishga bag‘ishlangan adabiyotlarning qisqacha tahlili keltirilgan hamda adabiyotlar tahlili asosida xulosalar qilingan.

Dissertatsiyaning **“Garmonik va statsionar bo‘lmagan to‘lqinlarning silindrik jismlarga yuklanishi masalasining matematik qo‘yilishi, yechish metodikasi va algoritmi”** deb nomlangan ikkinchi bobida ko‘p qatlamli silindrik jismda to‘lqin yuklanishi masalalarning matematik qo‘yilishi, yechish metodikasi va algoritmi keltirilgan. Ko‘rib chiqilayotgan barcha tizimlar qovushqoq-elastik va izotrop hisoblanadi. Masala elastiklik nazariyasining tekis deformatsiya holati masalasiga olib kelinadi va hisob sxemasi (1-rasm) quyidagicha ko‘rinishda bo‘ladi.



1-rasm. Ikki qatlamli jisnga elastik to‘lqinlar ta‘sirining hisob sxemasi

Qovushqoq- elastik muhitdagi ko'p qatlamli silindrik jismga to'liqin yuklanishi masalasi elastik nazariyasining Lamé tenglamasi orqali ifodalanadi:

$$\bar{\mu}_n \nabla^2 \bar{u} + (\bar{\lambda}_n + \bar{\mu}_n) \text{grad div } \bar{u} = \rho_n \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

Agar ko'p qatlamli muhitda joylashgan silindrik qatlamlar yupqa bo'lsa, Kirxgof-Lyav yoki Timoshenko gipotezalarini qanoatlantiradi:

$$L\bar{U} - L_0 \int_{-\infty}^t R_L(t-\tau) L\bar{U}(\tau) d\tau = \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0 h} \bar{p} + \rho_1 \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0} \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2} \right), \quad (2)$$

bunda $\bar{\lambda}_j, \bar{\mu}_j$ -operator ko'rinishdagi elastiklik modullari:

$$\bar{\lambda}_j f(t) = \lambda_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\lambda}^{(j)}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right]; \quad \bar{\mu}_j f(t) = \mu_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\mu}^{(j)}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right],$$

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

Bunda E_{01} - Yung moduli; $\bar{u} = \bar{u}(u_r, u_\theta, u_z)$ - qobiq o'rta sirtining ko'chish vektori (Kirxgof-Lyav gipotezalari o'rinli bo'lganda). Bu yerda $\bar{u}_j(u_{rj}, u_{\theta j}, u_{zj})$ - ko'chish vektori bo'lib, r, θ, z, t - ning funksiyasi; ρ_j - qatlam materialining zichligi; γ - qobiq materialining zichligi; $R_L(t-\tau)$ - relaksatsiya yadrosi; λ_{0j}, μ_{0j} - qatlamning qovushqoqlik nazariyasidagi oniy elastiklik moduli, E_{01} - qobiqning oniy elastiklik moduli.

Agar silindrik inshoot qatlamlardan tashkil topgan bo'lsa, u holda uning harakat tenglamalari (2) ko'rinishda bo'ladi. Quyidagicha kontakt va chegaraviy shartlar qo'yiladi:

1. Agar muhitda silindrik qobiq joylashgan bo'lsa, u holda kontaktda quyidagi chegaraviy shart bajariladi.

$$u_{r1} \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}} = U_r \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}}; \quad u_{\theta 1} \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}} = U_\theta \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}}; \quad u_{z1} \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}} = U_z \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}},$$

$$p_r = \sigma_{rr1}; \quad p_\theta = \sigma_{r\theta 1}; \quad p_z = \sigma_{rz1} \quad (3)$$

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

$$r = r_N : \quad \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)}; \quad \sigma_{rz k} = \sigma_{rz(k+1)};$$

$$u_k = u_{k+1}; \quad \mathcal{G}_k = \mathcal{G}_{k+1}; \quad w_k = w_{k+1}. \quad (4)$$

3. Qatlamlar orasida sirpanuvchanlik sharti (qatlamlar orasida qarshilik bo'lmasa) qo'yiladi

$$r = r_N : \quad \sigma_{rm} = \sigma_{rr(n+1)}; \quad \sigma_{r\theta n} = \sigma_{rz n} = 0; \quad \sigma_{r\theta(n+1)} = \sigma_{rz(n+1)} = 0; \quad w_n = w_{n+1}. \quad (5)$$

4. Agar $r=r_1$ birinchi qatlam suyuqliksiz yoki to'ldiruvchisiz bo'lsa, u holda kuchlanishlardan ozod bo'lish sharti qo'yiladi

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

5. Agar inshootdan radial koordinata cheksizlikka intilsa, u holda bo'ylama va ko'ndalang to'lqin potentsiali Zommerfeldning yutilish shartini qanoatlantiradi

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r\varphi = const, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} - ik\varphi \right) = 0,$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r\psi = const, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} - ik_2\psi \right) = 0. \quad (7)$$

Silindrik qobiqning va uning atrofidagi muhitdan tushayotgan garmonik to'lqinlar natijasida yuzaga keladigan dinamik kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlash talab qilinadi (1-rasm). Silindrik qatlamga (qobiqqa) P, SH yoki SV turlardagi garmonik to'lqinlardan biri ta'sir qiladi, deb faraz qilamiz:

$$\psi^{(p)} = \Psi_0^{(p)} \sin \theta_0 e^{i\alpha(x-ct)} \sum_{n=1}^{\infty} E_n b_{n1} J_n(\delta_1 r) \sin n\theta, \varphi^{(p)} = 0, \chi^{(p)} = 0; ,$$

$$\varphi^{(p)} = U_0^{(p)} e^{i\alpha(x-ct)} \sum_{n=1}^{\infty} E_n a_{n1} J_n(\gamma r) \cos k\theta, \psi^{(p)} = 0, \chi^{(p)} = 0; ,$$

$$\chi^{(p)} = -X_0^{(p)} \sin \theta_0 e^{i\alpha(x-ct)} \sum_{n=0}^{\infty} E_n c_{n1} J_n(\delta_1 r) \sin k\theta, \varphi^{(p)} = 0, \psi^{(p)} = 0; \quad (8)$$

bu yerda $\Psi_0^{(p)}, U_0^{(p)}, X_0^{(p)}$ - tushayotgan to'lqinlarning amplitudalari; J_n - birinchi turdagi silindrik Bessel funksiyasi.

Statsionar bo'lmagan to'lqinlar ta'sirida tushayotgan yuklanish vaqt funksiyasi sifatida bosqichli funksiya ko'rinishida qabul qilinadi. Qobiq yoki silindr chegarasida vaqt bo'yicha quyidagi ko'rinishdagi kuchlanish ta'sir etsin:

$$\sigma_{xx}^{(p)} = \sigma_0 H(\hat{t}); \sigma_{yy}^{(p)} = \sigma_0 \frac{V_N}{1-V_N} H(\hat{t}) \quad (9)$$

bu yerda $H(\hat{t})$ — Xevisaydning birlik funksiyasi.

To'ldiruvchili silindrik qobiq va uni o'rab turgan muhit uchun tuzilgan xususiy hosilali differensial tenglamalarda ko'chish vektori bo'ylama va ko'ndalang to'lqin potentsiallari orqali ifodalanadi, bunda Grin–Lemb almashtirishlari bajariladi.

$$\bar{u} = grad \varphi + rot \bar{\psi}, \quad rot \bar{\psi} = 0, \quad (10)$$

bu yerda φ – bo'ylama to'lqinlarning potentsiali; $\bar{\psi}(\psi_r, \psi_\theta, \psi_z)$ - ko'ndalang to'lqin potentsiali.

Silindrik koordinatalar sistemalarida siljishlar, deformatsiyalar va siljish potentsiallari vektorlari quyidagicha ifodalanadi:

$$u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_z}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi_\theta}{\partial z}; \quad u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \frac{\partial \psi_r}{\partial z} - \frac{\partial \psi_z}{\partial r}; \quad u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi_\theta}{\partial r} + \frac{\psi_\theta}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_r}{\partial \theta}; \quad (11)$$

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c_p^2 \Gamma_\kappa} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0; \quad \nabla^2 \psi_z - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_\kappa} \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial t^2} = 0; \quad \nabla^2 \psi_\theta - \frac{\psi_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_r}{\partial \theta} - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_\kappa} \frac{\partial^2 \psi_\theta}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \psi_r - \frac{\psi_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_\theta}{\partial \theta} - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_\kappa} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial t^2} = 0.$$

Disipativ mexanik tizimlarning tekis (yoki silindrik) jismlarda bo‘ylama (ko‘ndalang) to‘lqinlarning tarqalishi ko‘rib chiqiladi. (11) muammoning yechimi quyidagi ko‘rinishda qidiriladi:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n(\alpha_k r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pk} z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{rk}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{nr}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ -\cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pk} z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{\theta k}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{n\theta}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pk} z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{zk}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{nz}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ \cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pk} z} e^{-i\omega t}; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Bu yerda n -butun son; γ_{pk} - to‘lqin soni; ω - chastota; $r = \frac{r_1}{a_0}$, $z = \frac{z_1}{a_0}$.

Topilgan ko‘chishlar va kuchlanishlarni chegaraviy shartlarga qo‘yilib, quyidagi ko‘rinishdagi kompleks koeffitsiyentli tenglamalar sistemasiga kelinadi va hosil bo‘lgan sistemadan $A_{nj}, B_{nj}, C_{nj}, L_{nj}, M_{nj}, Z_{nj}$ ($j=1, 2, \dots, N$) noma’lumlar aniqlanadi:

$$[C]\{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{P}\}. \quad (13)$$

Bu yerda $\{\mathbf{q}\} = [A_{n1}, B_{n1}, C_{n1}, L_{n1}, M_{n1}, Z_{n1}, \dots, A_{nN}, B_{nN}, C_{nN}, L_{nN}, M_{nN}, Z_{nN}]^T$,

$\{\mathbf{P}\} = [P_{1N}, P_{2N}, P_{3N}, \dots, 0, 0]^T$ -tashqi yuklamalar matritsasi; $[C]$ - $(4N * 4N)$ o‘lchamli kvadrat matritsa. Kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalar sistemasi (13) noma’lumlarni ketma-ket yo‘qotish usuli, ya’ni Gauss usuli yordamida yechiladi. Statsionar bo‘lmagan muammolarni hal qilish uchun Furye integral almashtirishlari usuli qo‘llaniladi. Teskari Furye almashtirilishi Romberg usuli yordamida sonli amalga oshiriladi.

Dissertatsiyaning **“Qovushoq-elastik ko‘p qatlamli silindrik jismda garmonik to‘lqinlarning difraksiyasi”** deb nomlangan uchinchi bobida Silindrik qobiqdagi garmonik to‘lqinlarning difraksiyasi masalasi o‘rganilgan. Muammo siljish potentsiallari yordamida hal etilgan. Yechish usuli va algoritmi ishlab chiqilgan hamda garmonik to‘lqin (yoki seysmik) zonalar uchun akademiklar A.A. Ilyushin va T.R. Rashidovlar tomonidan ishlab chiqilgan seysmo-dinamik nazariyaga muvofiq hisoblash natijalari bilan taqqoslangan. O‘rganilayotgan masalalar elastiklik nazariyasining tekis holatiga keltirilgan.

Tekis garmonik to‘lqinlar ta’sirida qatlam va qobiqning kuchlanish-deformatsiya holatini aniqlash uchun siljish va kuchlanishlar quyidagi ko‘rinishda ifodalanadi:

$$u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_\theta}{\partial \theta}, u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi_\theta}{\partial r}; \quad (14)$$

$$\frac{1}{2\mu} \sigma_{rr} = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \alpha^2 \varphi + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} \right),$$

$$\frac{1}{2\mu} \sigma_{\theta\theta} = \frac{-\nu}{(1-2\nu)} \alpha^2 \varphi + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} \right), \quad (15)$$

$$\frac{1}{2\mu} \sigma_{r\theta} = \frac{1}{2} \beta^2 \psi + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} \right).$$

Tushuvchi bo‘ylama to‘lqinlar potentsiali quyidagi ko‘rinishda olinadi:

$$\varphi_1^{(p)} = \varphi_0 \sum_{n=0}^{\infty} (E_n i^n J_n(\alpha_1 r) \cos(n\theta)) e^{-i\omega t}, \psi_1^{(p)} = 0 \quad (16)$$

bu yerda $E_n = \{1, n=0; 2, n \geq 1\}$.

Muhitdagi qobiqdan qaytgan to‘lqin potentsiallari quyidagicha ko‘rinishda bo‘ladi:

$$\begin{pmatrix} \varphi^{(s)} \\ \varphi^{(f)} \\ \varphi^{(\xi)} \end{pmatrix} = e^{i\omega t} \sum_{n=0}^{\infty} \cos(n\theta) \begin{cases} A_n H_n^{(1)}(\alpha_1 r), & r \geq c, \\ C_n H_n^{(1)}(\alpha_2 r) + D_n H_n^{(2)}(\alpha_2 r), & \text{bu yerda } b \leq r \leq c, \\ C_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r), & a \leq r \leq b, \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} \psi^{(s)} \\ \psi^{(f)} \\ \psi^{(\xi)} \end{pmatrix} = e^{i\omega t} \sum_{n=0}^{\infty} \sin(n\theta) \begin{cases} B_n H_n^{(1)}(\beta_1 r) & r \geq c, \\ L_n H_n^{(1)}(\beta_2 r) + M_n H_n^{(2)}(\beta_2 r) & \text{bu yerda } b \leq r \leq c, \\ F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) & a \leq r \leq b, \end{cases} \quad (18)$$

bu yerda $\alpha_j^2 = \frac{\omega^2}{C_{p_j}}$, $\beta_j^2 = \frac{\omega^2}{C_{p_j}}$, ($j=1,2,3$).- mos keladigan tashqi va ichki

qatlamlarning to‘lqin soni.

Yuqoridagi ixtiyoriy konstantalar $A_n, B_n, C_n, D_n, L_n, M_n$ chegara shartlaridan aniqlanadi. Chegara shartlariga ko‘chish va kuchlanishlar (15) ni qo‘yib, kompleks algebraik tenglamalar tizimini olamiz:

$$[C_n] \{q_n\} = \{P_n\}, \quad (19)$$

Bu yerda $[C_n]$ — kvadrat kompleks matritsa, $\{P_n\}$ esa tashqi yuklanishlarning ustun-vektoridir. Sirpanish kontakti sharti (5) bo‘yicha, kompleks algebraik tenglamalar tizimi (19) ning elementlari quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$C(1,3) = C(1,2) = P(1) = 0, C(3,1) = C(3,2) = P(3) = 0. \quad (20)$$

(19)-sonli tenglamadagi matritsaning qolgan elementlari o‘zgarishsiz qoldiriladi. Kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalar tizimi (19) Gauss usuli bilan yechiladi.

Qobiqlardagi ko‘chish va kuchlanishlar quyidagicha bo‘ladi:

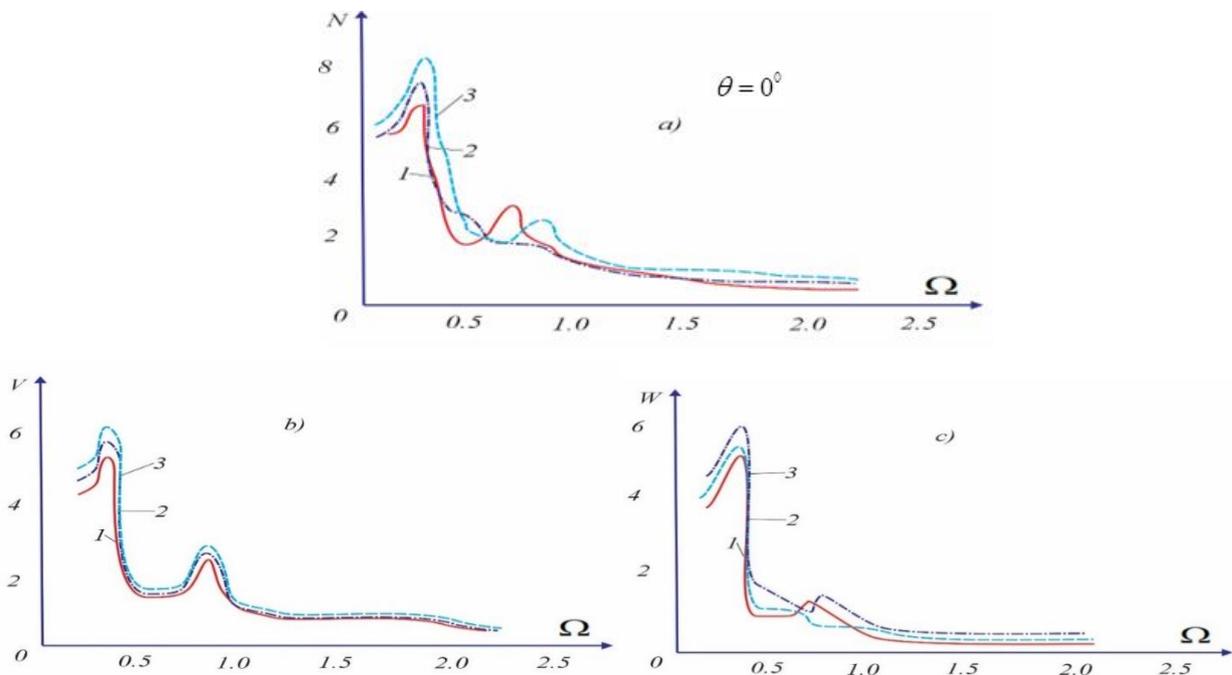
$$U_\theta^\xi = \sum_{n=0}^{\infty} [G_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r)] + [F_n H_n^{(1)}(\beta_2 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r)] \sin(n\theta) e^{-i\omega t},$$

$$U_r^\xi = \sum_{n=0}^{\infty} [\beta(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r)] + \frac{n}{r} [F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r)] \cos(n\theta) e^{-i\omega t}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{r\theta}^{(\xi)} = & \sum_{n=0}^{\infty} \zeta_{\xi} p \frac{1}{2} \beta_3 \left(F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) \right) + \frac{1}{p} F_n H_n^{(1)'}(\beta_3 r) Z_n H_n^{(2)'}(\beta_3 r) - \\
& - \frac{n^2}{p} \left(F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) \right) + \frac{n}{p} \left(G_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right) - \\
& n \left(G_n H_n^{(1)'}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)'}(\alpha_3 r) \right) \sin(n\theta) e^{-i\omega t}, \\
\sigma_{rr}^{(\xi)} = & \sum_{n=0}^{\infty} \zeta_{\xi} p \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \alpha_3^2 \left(G_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right) + \frac{1}{r} G_n H_n^{(1)'}(\alpha_3 r) + \\
& Q_n H_n^{(2)'}(\alpha_3 r) - \frac{n^2}{r} \left(G_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right) + \frac{n}{r} \left(F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) \right) - \\
& n \left(F_n H_n^{(1)'}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)'}(\beta_3 r) \right) \cos(n\theta) e^{-i\omega t}.
\end{aligned} \tag{22}$$

Bu yerda $\zeta_{\xi p} = \frac{\mu_{\xi}}{\mu_p}$, μ_{ξ} – ichki qatlamning Lamé koeffitsiyenti.

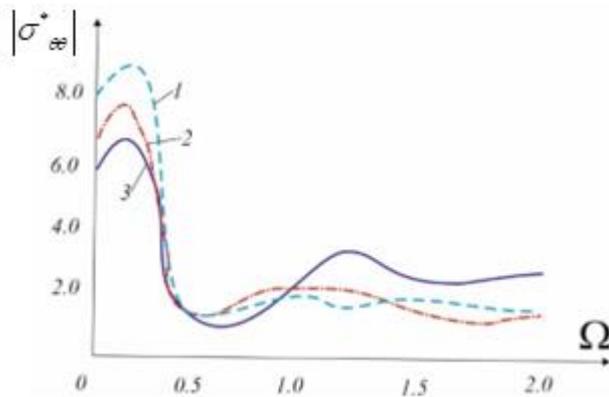
Yuqoridagi hisoblashlar orqali quyidagi sonli natijalar olindi.



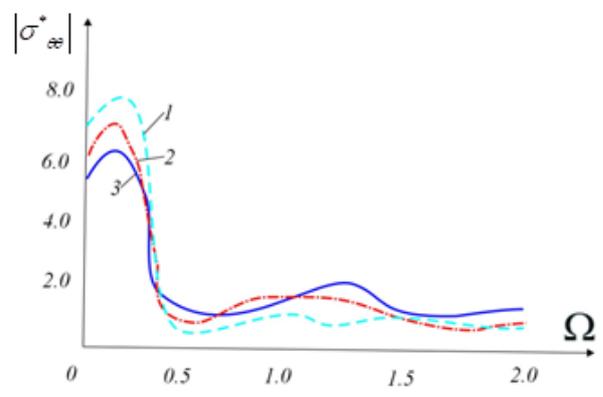
2-rasm. Qobiqdagi kuchlanish omillarining chastotaga bog‘liq ravishda o‘zgarishi (muhit–qatlam–qobiq tizimi, bunda qatlam qovushqoq-elastik hisoblanadi). 1. $\frac{E_2}{E_0} = 0,1$; 2. $\frac{E_2}{E_0} = 0,3$; 3. $\frac{E_2}{E_0} = 0,4$

Grafik tahlillar shuni ko‘rsatadiki (2-rasm), qobiq va muhit o‘rtasidagi o‘zaro ta‘sir natijasida muhitda induksiyalanadigan kuchlanishlar qobiqdagi kuchlanish darajasini 20–25% ga kamaytiradi. Bu holat muhitning deformatsiyalarga nisbatan dissipativlovchi xususiyatga ega ekanligini hamda to‘lqin energiyasining ma’lum bir qismi muhit tomonidan yutilishini tasdiqlaydi. Ayniqsa, yuqori chastotali yuklanishlar sharoitida interfeys sohasida kuchlanish amplitudalari farqi vujudga keladi.

Quyidagi 3- va 4-rasmlarda muhitning qovushqoq-elastik va elastik bo‘lgan holati uchun sonli natijalar olingan. Agar qovushqoqlik hisobga olinsa, kontur kuchlanish $|\sigma_{\theta\theta}^*|$ ni kamaytirish mumkin ekan. 4 –rasmdan xulosa shuki, $|\sigma_{\theta\theta}^*|$ ning to‘lqin soniga bog‘liqlik tabiati elastik holat bilan bir xil, lekin $\sigma_{\theta\theta}^*$ ning maksimal qiymati 10-15% ga pastroq ekan.

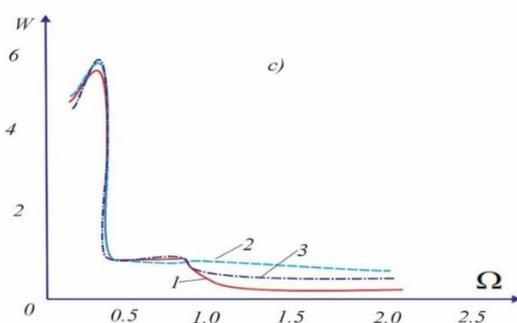
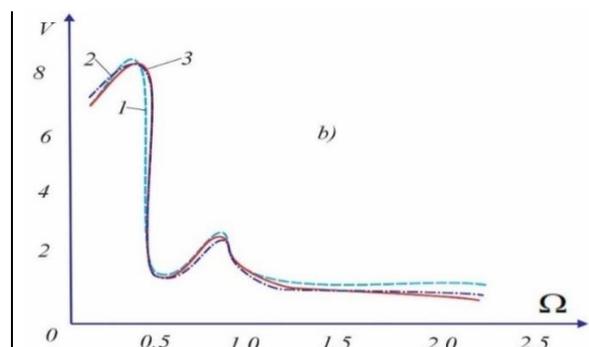
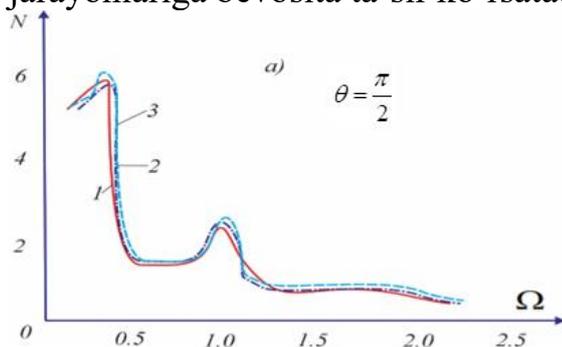


3-rasm. Kontur kuchlanishining to‘lqin soniga hamda muhitning Puasson koeffitsiyentiga bog‘liq o‘zgarishi (Ω -to‘lqin soni), 1. $\nu = 0.15$; 2. $\nu = 0.25$; 3. $\nu = 0.35$ (muhit-elastik).



4-rasm. Kontur kuchlanishining to‘lqin soniga bog‘liq o‘zgarishi (Muhit qovushqoq-elastik).

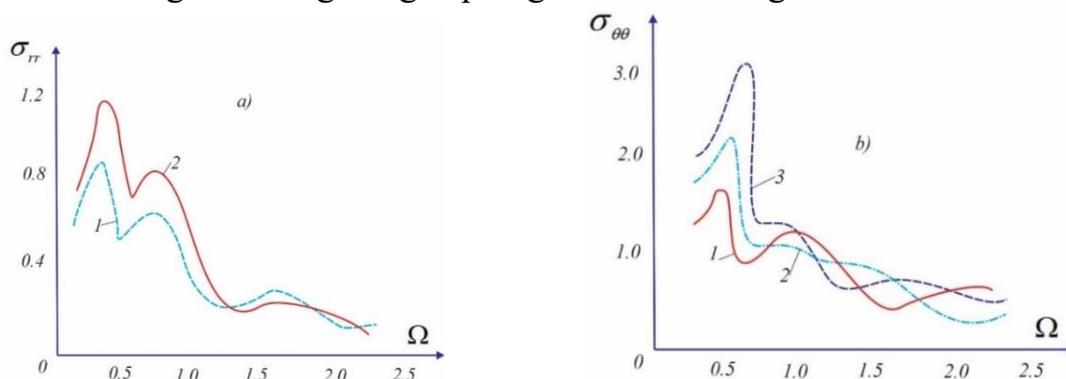
5-rasmda (a, b, c) qovushqoq-elastik muhit, oraliq qatlam va silindrik qobiqlardan tashkil topgan tizimda kuch omillarining chastotaga bog‘liq o‘zgarishi ko‘rsatilgan. Ushbu grafiklarda “muhit–qatlam–qobiq” tizimi uchun kuchlanish omillarining chastotaga nisbatan dinamik jarayoni tahlil qilingan. Natijalardan ko‘rinadiki, turli chastotalarda kuch omillarining qiymatlari sezilarli darajada farqlanadi, bu esa rezonans holatlari va energiya dissipatsiyasi jarayonlariga bevosita ta’sir ko‘rsatadi.



5-rasm. Qobiqning kuch omillarining chastotaga bog‘liq o‘zgarishi (qatlam qovushqoq-elastik).

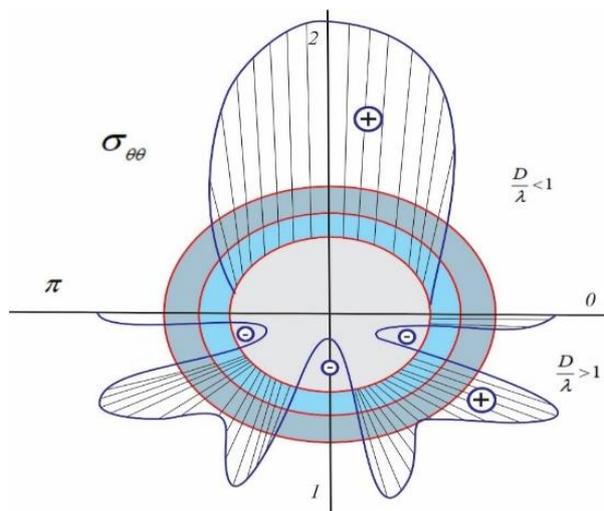
1. $\frac{E_2}{E_0} = 0,1$; 2. $\frac{E_2}{E_0} = 0,3$; 3. $\frac{E_2}{E_0} = 0,4$

Bunda parametrlarning quyidagi qiymatlari qabul qilingan: $\frac{R_1}{R_0} = 1,2$ (R_1 va R_0 - qatlamning mos ravishda tashqi va ichki radiuslari); $\frac{E_1}{E_0} = 0,4$, $\frac{\rho_1}{\rho_0} = 0,156$, $\nu_0 = \nu_1 = 0,25$, E_0, ρ_0, ν_0 - qatlamning elastiklik parametrlari, E_1, ρ_1, ν_1 - muhitning elastiklik parametrlari. 6-rasmda ikki qatlamli silindrik qobiqdan tashkil topgan “muhit–qatlam–qatlam” tizimda (qatlam –qovushqoq-elastik) kontur va radial kuchlanishlarning chastotaga bog‘liq o‘zgarishi tasvirlangan.



6-rasm. Ikki qatlamli silindrik qobiqdagi kontur va radial kuchlanishlarning chastotaga bog‘liq o‘zgarishi (muhit – qovushqoq-elastik).

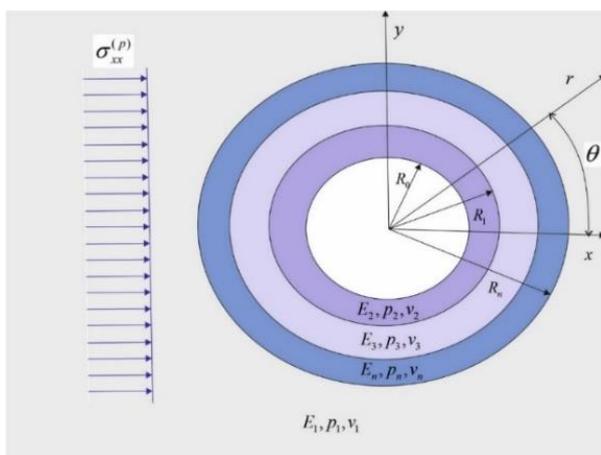
7-rasmda esa uzun va qisqa to‘lqin uzunliklaridagi kontur kuchlanishi taqsimotining epyurasi tasvirlangan. Grafiklardan ko‘rinib turibdiki, tizimdagi kuchlanish komponentlari chastotaning ortishi bilan ma’lum chegaralarda keskin o‘zgaradi. Ayniqsa, ayrim chastotalarda kuchlanishlarning lokal maksimumlarga ega bo‘lishi rezonans hodisalarining yuzaga kelish xavfini ko‘rsatadi.



7-rasm. Uzun va qisqa to‘lqin uzunliklarida kontur kuchlanish taqsimoti epyurasi

Dissertatsiyaning «**Statsionar bo‘lmagan to‘lqinlarning elastik muhitda joylashgan silindrik jismlar bilan o‘zaro ta’siri**» deb nomlangan to‘rtinchi bobida, elastik muhitda joylashgan silindrik jismlar bilan turg‘un bo‘lmagan to‘lqinlarning o‘zaro ta’siri masalasining matematik qo‘yilishi, uni yechish metodikasi va hisoblash algoritmi bayon qilingan, shuningdek, sonli natijalar keltirilib, asosli xulosalar chiqarilgan.

Cheksiz elastik muhitda ichki bo'shlig'i bo'lmagan elastik silindr joylashgan deb faraz qilamiz (8-rasm). Qatlamli silindrga kuchlanishning turg'un bo'lmagan to'liqlari $\sigma_{xx}^{(i)}$ va $\sigma_{yy}^{(i)}$ tushadi, ularning old fronti silindrning bo'ylama o'qiga parallel. Tushayotgan kuchlanish impulsi ta'sirida silindr va uni o'rab turgan muhitning dinamik kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlash talab etiladi.



8-rasm. Statsionar bo'lmagan to'liqlarning elastik muhitda joylashgan silindrik jism bilan o'zaro ta'siri hisob sxemasi

Silindrik qobiqqa tushayotgan nostatsionar to'liq (9) ko'rinishda bo'lsin. Boshlang'ich shartlar quyidagi ko'rinishda ifodalansin:

$$\left. \frac{\partial \varphi_j}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j}{\partial \theta} \right|_{t=0} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \varphi_j}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j}{\partial \theta} \right]_{t=0} = 0 \quad \left. \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_j}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi_j}{\partial r} \right|_{t=0} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial \psi_j}{\partial \theta} + \frac{\partial \psi_j}{\partial r} \right]_{t=0} = 0. \quad (23)$$

Bu yerda $j=1, 2, \dots, N, N-1$ — silindrik qavatlar soni, $j=N$ — o'rab turgan muhit.

Masalani yechish uchun vaqt bo'yicha Furrye integral o'zgarishlari qo'llaniladi:

$$f^F(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\Omega t} dt, \quad f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\Omega) e^{-i\Omega t} d\Omega \quad (24)$$

Boshlang'ich (23) shartlarni qo'llab, Furrye integral o'zgarishlari (24) ni qo'llagan holda, $R_{\lambda_j} = R_{\mu_j} = 0$ shartida quyidagi Gelmgols tenglamalari hosil bo'ladi:

$$\frac{\partial^2 \varphi_j^F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j^F}{\partial r} + \left(\frac{\Omega^2}{c_{pj}^2} - \frac{n^2}{r^2} \right) \varphi_j^F = 0; \quad \frac{\partial^2 \psi_j^F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_j^F}{\partial r} + \left(\frac{\Omega^2}{c_{sj}^2} - \frac{n^2}{r^2} \right) \psi_j^F = 0. \quad (25)$$

Tushayotgan impuls (9) quyidagicha ko'rinishga keltiriladi:

$$\sigma^{(p)} = \sigma_0 H(\hat{t} - x) = \frac{\sigma_0}{\Omega} e^{i \frac{\Omega}{C_p} (R_0 - r \cos \theta)} \quad (26)$$

Qutb koordinatalariga o'tib, quyidagilarni hosil qilamiz:

$$\sigma_{rr}^{(p)} = \frac{\sigma_0}{i\Omega} \sum_{n=0}^{\infty} E_n t^{n-1} J_n \left[\frac{\Omega}{C_p} r \right] \cos(n\theta), \quad (27)$$

bu yerda Ω -Furrye integral o'zgarishining parametri, $\varphi_j^F(\Omega)$ - $\varphi_j(t)$ funktsiyasining Furrye tasviri.

Shuningdek, (25) tenglamalarning yechimlari quyidagicha ifoda qilinadi:

$$\begin{bmatrix} \varphi_j^F(r, \theta, \Omega) \\ \psi_j^F(r, \theta, \Omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_j^F(r, \Omega) \\ \psi_j^F(r, \Omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(n\theta) \\ \sin(n\theta) \end{bmatrix}, \quad (28)$$

bu yerda

$$\Phi_j^p(r, \Omega) = \begin{cases} A_{nN} H_n^{(1)}(\Omega r / c_{p_N}) & r \geq r_N, \\ A_{nj} H_n^{(1)}(\Omega r / c_{p_j}) + B_{nj} H_n^{(2)}(\Omega r / c_{p_j}) & \text{agar } r_0 \leq r \leq r_N \quad (j=1, 2, \dots, N-1) \\ A_{n0} J_n(\Omega r / c_{p_0}) & 0 \leq r \leq r_0; \end{cases} \quad (29)$$

$$\psi_j^F(r, \Omega) = \begin{cases} L_{nN} H_n^{(1)}(\Omega r / c_{p_N}) & r \geq r_N, \\ L_{nj} H_n^{(1)}(\Omega r / c_{p_j}) + M_{nj} H_n^{(2)}(\Omega r / c_{p_j}) & \text{agar } r_0 \leq r \leq r_N \quad (j=1, 2, \dots, N-1) \\ L_{n0} J_n(\Omega r / c_{p_0}) & 0 \leq r \leq r_0 \end{cases} \quad (30)$$

(29) va (30) ifodalarni (31) tenglama yechimiga qo'yish orqali, mos keluvchi kuchlanishlar va siljishlar (20) formula ko'rinishida aniqlanadi. Bu yerda faqat nolga teng bo'lmaydigan kuchlanish — kontur kuchlanish bo'lib, u quyidagi tarzda ifodalanadi:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta}^F(r, \theta, \Omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \zeta_{\varepsilon p} \left[\frac{\nu}{1-2\nu} \alpha_3^2 G_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + \frac{1}{r} \left[G_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\alpha_3 r) - \frac{n^2}{r} F_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\alpha_3 r) \right] + \right. \\ \left. + \frac{n}{r} \left(F_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\beta_3 r) - n F_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\beta_3 r) \right) \right] \cos(n\theta), \end{aligned} \quad (31)$$

(26) ni qo'llagan holda, bu funktsiyaning asl nusxasi (originali)ni topamiz:

$$\sigma_{\theta\theta}(r^*, \theta^*, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{\theta\theta}^F(r^*, \theta^*, \Omega) e^{-i\Omega\tau} d\Omega. \quad (32)$$

Sonli natijalar $\nu = 0.25; C_p / C_a = 0.5; \theta = 0^\circ, 90^\circ$ holatlar uchun olindi. (32) integralni hisoblashda integral chegaralari ω_a va ω_b quyidagicha tanlanadi: $10^{-4} N$ ($N = 1, 2, 3, 4, 5$), va qadam uzunliklari $h = 0.1; 0.01; 0.001$ bo'ladi. $N = 5$ va $N = 6$ qiymatlarida kontur kuchlanishning qiymati beshinchi raqamdan keyin juda kam miqdorda o'zgaradi. $\sigma_{\theta\theta}$ ning turli $n = 1, 2, 3, 4, 5$ bo'yicha τ ga bog'liq o'zgarishlari ($\theta = 0^\circ, \pi/2$) keltirilgan. Olingan sonli natijalar Pao Y.H. Mow C.C. ning ma'lum natijalari bilan taqqoslandi. Xatolik $h = 0.1$ bo'lganda 30% ni tashkil etadi ($h = 0.01$ va $\theta = 90^\circ$ holatida maksimal kontur kuchlanishi 2.962/3.0 ga teng bo'ldi va, Pao Y.H., Mow C.C. ga ko'ra, bu qiymat 3.28/3.0 ($\tau = 4.71$) ga teng edi).

Statsionar bo'lmagan to'lqinlarning (22) ikki qatlamli silindrik jism (qobiq) bilan o'zaro ta'sirini ko'rib chiqamiz ($J = 1, 2$). Ichki chegaraning ($r = r_0$) kuchlanishdan holi ekanligini va atrof-muhit bilan aloqa nuqtasida ko'chish va kuchlanishlar tengligi (21) ni bajarishini faraz qilamiz. Masala Furye integral almashtirish usuli yordamida t^* bo'yicha hal qilinadi.

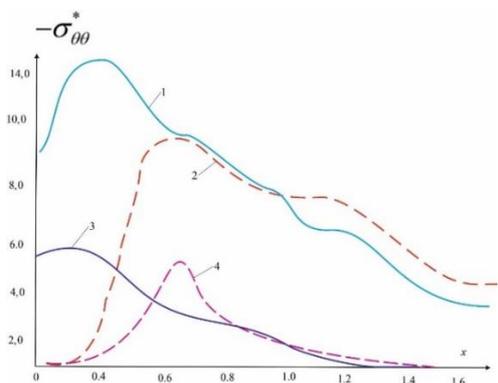
Algoritmni boshqarish uchun metod ishlab chiqilgan, bu esa (32) turidagi integrallarni sonli hisoblashni amalga oshiradi. Hisoblash natijalari 9 va 10-rasmlarda keltirilgan, bu yerda $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ ($\nu_1 = 0.2, \nu_2 = 0.25, r_0 / r_1 = 0.5, E / E_1 = 0.1; 0.5, \eta = 0.1$). Olingan natijalarni Pao Y.H. va Mow C.C. ning ishlari bilan

solishtirish natijasi 10% gacha farqni ko'rsatdi. Shunga o'xshash natijalar elastik muhitdagi silindrik qoplamalar uchun ham olingan.

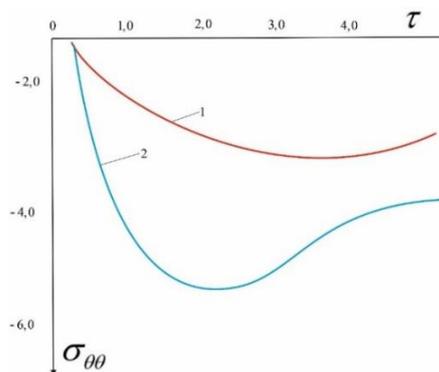
Algoritmni boshqarish uchun maxsus metod ishlab chiqilgan bo'lib, u (32) ko'rinishidagi integrallarni sonli hisoblash imkonini beradi. Olingan sonli natijalar Pao Y.H. va Mow C.C. tomonidan keltirilgan natijalar bilan solishtirildi, bu yerda integralning chegaralari $\omega_a = 10^{-4}$, $\omega_b = 2 \cdot 10^{-4}$ bo'lib, bu holda bizning hisoblash natijalarimiz Pao Y.H. va Mow C.C. ning natijalaridan 20% gacha farq qiladi.

9-rasmda kontur kuchlanishning o'zgarishi $\sigma_{\theta\theta}^*$ ($\theta = 90^\circ, r = \frac{r_0 - r_1}{2}; r = r_1$) , t ga bog'liq, ko'rsatilgan. Tashqi va ichki yuzalardagi kuchlanishlar o'rtasidagi farq 15 - 18% ga teng; o'rta va ichki yuzalar kuchlanishlari o'rtasidagi farq esa 10% ga yetadi ($r_0 / r_1 = 0.5$). Hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, vaqt o'tishi bilan, ya'ni $t = 120 / c_p$ bo'lganda, ushbu tadqiqot natijalari B.S. Rahmonov va I.I. Safarov ishlarida keltirilgan aniq statik qiymat $\sigma_{\theta\theta}^* = 8.13$ ga yaqinlashadi.

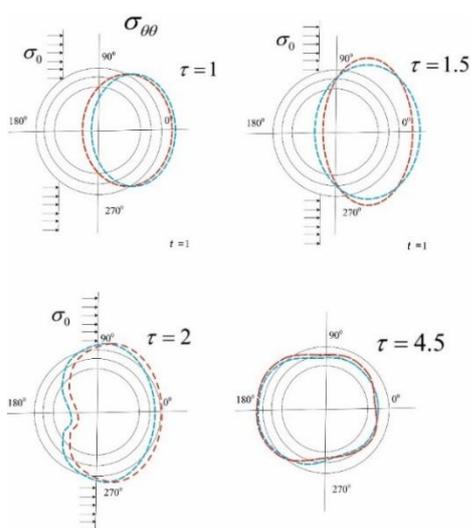
10-rasmda erkin yuzadagi kontur kuchlanishning vaqtga bog'liq o'zgarishi ko'rsatilgan. 11-rasmda esa vaqtning ma'lum bir qiymatida ikki qatlamli silindrik jismning erkin yuzasidagi kontur kuchlanishning epyura tasviri berilgan.



9-rasm. Kontur kuchlanishning vaqtga bog'liq o'zgarishi



10-rasm. Kontur kuchlanishning vaqtga bog'liq o'zgarishi



11-rasm. Kontur kuchlanishning vaqtga bog'liq o'zgarishi epyurasi

11-rasmda ikki qatlamli silindrik jismning o'rta sirtidagi kontur kuchlanishining 1, 1.5, 2 va 4 soniyalardagi o'zgarishlari tasvirlangan. Grafik va epyuralar tahliliga ko'ra, dastlab kuchlanish cho'zilish xarakteriga ega bo'lib, vaqt o'tishi bilan siqilish bosqichiga o'tadi. Shuningdek, kuchlanishlar vaqtning boshlang'ich onida maksimal qiymatga erishayotganini ko'rish mumkin.

UMUMIY XULOSALAR

1. Elastik va qovushqoq-elastik ko'p qatlamli silindrik qobiqda garmonik va nostatsionar to'lqinlar difraksiyasi jarayonlarini o'rganish masalasining matematik qo'yilishi keltirildi. Mazkur muammoni yechish uchun zarur bo'lgan nazariy va metodik asoslar hamda hisoblash algoritmi ishlab chiqildi.

2. Taklif etilgan algoritm va dasturiy ta'minot asosida qovushqoq-elastik muhitda joylashgan ko'p qatlamli silindrik qobiqlarda garmonik bo'ylama va ko'ndalang to'lqinlar ta'sirida yuzaga keladigan maksimal kuchlanishlar uzun to'lqinlar sohasi ($D/\lambda < 1$) uchun aniqlangan. Tadqiqotlar natijasida qatlamlar sonining ortishi muhitning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatiga ta'siri 10% dan oshmasligi aniqlandi, bu esa qatlamlashgan strukturalarning to'lqin ta'siriga nisbatan barqarorligini ko'rsatadi.

3. Hisoblash natijalari kuchlanishlarning maksimal qiymatlari qatlamning ichki konturida ($r = a$) yuzaga kelishini ko'rsatdi. Ushbu kuchlanishlar kontur kuchlanishlari bo'lib, ularning qiymati statik kuchlanishlarga nisbatan 15% yuqori ekani aniqlangan.

4. Qatlam qalinligi kamayganda, nisbatan qattiq qatlamlar uchun kuchlanish konsentratsiyasining ortishi kuzatildi. Aksincha, yumshoq qatlamlar uchun $0.3 \leq D/\lambda \leq 0.45$ oraliqda qarama-qarshi holat - kuchlanish konsentratsiyasining kamayishi kuzatilgan. Bo'ylama to'lqin tushganda maksimal kontur kuchlanishlar 90° va 270° burchaklarda, ko'ndalang to'lqin tushganda esa 45° va 135° burchaklarda yuzaga kelishi aniqlangan.

5. Qobiq nazariyasi va Lame tenglamalari asosida olingan sonli natijalar orasidagi tafovut 15% gacha bo'lishi mumkinligi aniqlangan. Muhitning qovushqoqligini hisobga olish kuchlanishlar konsentratsiyasini 10% ga kamaytirish imkonini berishi ko'rsatildi, bu esa qovushqoq-elastik xususiyatlarning dinamik yuklanish holatlarida ahamiyatli ekani haqida dalolat beradi.

6. Nostatsionar to'lqinlar ta'sirida muhit va qobiqda hosil bo'ladigan dinamik jarayonlarni o'rganishga qaratilgan metodika va hisoblash algoritmi ishlab chiqildi. Bu metodika Furye integral almashtirilishi, shuningdek, Gauss va Romberg sonli integrallash usullariga asoslangan. Hisoblash natijalari kuchlanishlarning vaqtning boshlang'ich momentida maksimal qiymatga erishishini ko'rsatdi.

7. Sonli natijalar tahlilidan ko'rinadiki, qovushqoq-elastik holatda qobiqning kontur kuchlari elastik kuchlardan sezilarli darajada kam(kichik) bo'ladi.

8. Uzun to'lqinlar tahlil qilinganda, juda katta yoki juda kichik kuchlanishlarda ko'chishlar 10^{-8} aniqlikda hisoblangan. To'lqin soni ortishi bilan ko'chish va kuchlanishlar doimiy ravishda kamayishi aniqlandi.

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

ТАШКЕНТСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЧОРИЕВ МИРЖАЛОЛ

**ДИФРАКЦИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН НА
МНОГОСЛОЙНОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ
ОБОЛОЧКЕ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
**диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-
математическим наукам**

БУХАРА–2025

Тема диссертации на соискание учёной степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована под номером 2024.4.PhD/FM964 в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

Диссертация выполнена в Ташкентском химико-технологическом институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Бухарского государственного технического университета (www.https://bstu.uz/) и на Информационно-образовательном портале “Ziyonet” (www.ziyonet.uz)

Научный руководитель:

Сафаров Исмоил Иброхимович

доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Ибрахим Мирзаев

доктор физико-математических наук, профессор

Исмаилов Кубаймурат

доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

Наманганский государственный технический университет

Защита диссертации состоится 4 октября 2025 г. в 11:³⁰ часов на заседании Научного совета Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 при Бухарском государственном техническом университете по адресу: 200100, г.Бухара, ул. К. Муртазаева, 15. Тел.: (+99865) 223-78-84; факс: (+99865) 223-79-72, e-mail: bstu_info@edu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарском государственном техническом университете (зарегистрирована за №471). (Адрес:Бухарская область, 200100, г. Бухара, ул. К. Муртазаева, 15. Тел.: (+99895) 604-44-70).

Автореферат диссертации разослан 20 сентября 2025 года.

(протокол рассылки №4 от 9 августа 2025 г.)



М.Х. Тешаев,

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

Р.А. Сабирова,

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, кандидат физико-математических наук (PhD)

З.И. Болтаев,

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

ВВЕДЕНИЕ(аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертационного исследования. В мире одной из важнейших проблем является обеспечение сейсмостойкости подземных сооружений, возводимых в сейсмоактивных районах, с использованием современных технических решений и технологий. Остро стоит необходимость изучения напряжений и деформаций, возникающих в подземных конструкциях под воздействием взрывных и сейсмических волн, а также исследования дифракции волн и внедрения этих знаний в инженерную практику. В этом контексте особое значение приобретает применение современных технических средств и программных комплексов, направленных на предотвращение резонансных явлений, возникающих под воздействием динамических нагрузок на различные конструктивные элементы современных подземных сооружений.

В мире, в частности в таких развитых странах, как США, Германия, Россия и Китай, активно ведутся научно-исследовательские работы, направленные на повышение прочности и надёжности конструкций, а также на разработку современных математических моделей и вычислительных методов с учётом воздействия волн. В этом направлении особое внимание уделяется изучению процессов распространения и дифракции волн в конструкциях нового поколения, с целью предотвращения превышения допустимых пределов напряжений и деформаций, возникающих при их эксплуатации, а также оптимизации конструктивных решений.

В нашей Республике также наблюдается активное развитие строительной отрасли. В частности, реализуются широкомасштабные мероприятия, направленные на разработку технических и технологических решений, обеспечивающих надёжную эксплуатацию подземных сооружений и коммуникационных систем при различных динамических нагрузках, что уже дало определённые результаты. В этой связи изучение воздействия волн с учётом местных условий и разработка современных научных подходов приобретает большое практическое значение.

В Указе Президента Республики Узбекистан от 30 мая 2022 года № ПФ-144 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности Республики Узбекистан» определён ряд приоритетных задач.¹ Создание алгоритмов и программ в рамках данного направления исследований имеет важное значение для их реализации. Кроме того, постановление Президента Республики Узбекистан от 16 мая 2023 года № ПК-158 «О дополнительных мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан»², а также постановление от 17 апреля 2024 года № ПК-161 «О мерах по повышению сейсмостойкости зданий и сооружений и совершенствованию деятельности по мониторингу сейсмической опасности»

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

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

и другие нормативно-правовые документы, регулирующие данную сферу, подчёркивают актуальность и значимость настоящего диссертационного исследования, которое в определённой степени способствует выполнению указанных задач³.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.

Данное диссертационное исследование выполнено в рамках направления развития науки и техники Республики Узбекистан IV «Математика, механика, сейсмическая динамика сооружений и информатика».

Степень изученности проблемы

Вопросы воздействия сейсмических волн на многослойные цилиндрические оболочки были предметом углублённых научных исследований ряда выдающихся зарубежных учёных, таких как А.А. Илюшин, Е.И. Шемякин, Уайт, Дж.Д. Ахенбах, И.Е. Трояновский, Л.И. Слепян, Н.Н. Фотиева, Н.С. Буличев и других. Значительный вклад в решение данной научной проблемы внесли также узбекские учёные, среди которых следует отметить М.Т. Уразбаева, Т.Ш. Ширинкулова, Х.А. Рахматулина, В.К. Кабулова, Т.Р. Рашидова, Я.Н. Муборакова, Б.М. Мардонова, К.С. Султанова, Ш.М. Маматкулова, М.М. Мирсаидова, И. Мирзаева, Г.Х. Ходжиметова, А.А. Ишанходжаева, Т.М. Мавлонова, Ш.С. Юлдашева, А.А. Абдусаттарова, И.И. Сафарова, Х.Х. Худайназарова, М.Х. Тешаева, М.К. Усарова, Б.Ш. Усмонова и других. Ими были разработаны эффективные методы определения параметров сейсмостойкости с учётом реологических свойств материалов, что позволило существенно углубить понимание динамических характеристик цилиндрических и сферических конструкций.

В настоящее время в динамике диссипативных систем, связанных с бесконечной упругой средой, существует ряд нерешённых проблем, решение которых способствует выявлению новых закономерностей колебательных процессов и дифракции волн. Разработка надёжных методов и алгоритмов позволит решить множество задач, связанных с динамической прочностью и устойчивостью, в частности, при проектировании машиностроительных конструкций и строительстве подземных сооружений.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Данное диссертационное исследование выполнено в соответствии с научно-технической программой научно-исследовательского плана «Научно-практические проблемы математики» Ташкентского химико-технологического института, рассчитанного на 2015–2024 годы.

Целью исследования является разработка математической постановки, методов и алгоритмов решения задач нагружения продольными или поперечными (гармоническими или нестационарными) волнами многослойной цилиндрической оболочки, расположенной в вязкоупругой среде, а также анализ численных результатов.

³ Постановление Президента Республики Узбекистан от 17 апреля 2024 года № ПП-161 «О мерах по повышению сейсмостойкости зданий и сооружений и совершенствованию деятельности по мониторингу сейсмической опасности»

Задачи исследования:

- разработка методики и алгоритмов определения напряжённо-деформированного состояния многослойных цилиндрических оболочек, находящихся в контакте с вязко-упругой средой, под воздействием продольных (или поперечных) волн.

- оценка зависимости напряжённого состояния двух- и трёхслойных цилиндрических оболочек, размещённых в вязко-упругой среде, от длины волны и частоты при гармоническом волновом воздействии.

- разработка алгоритмов, основанных на преобразовании Фурье и методах Рунге-Кутты, для определения напряжений, возникающих в двухслойных цилиндрических оболочках под воздействием нестационарных волн во вязко-упругой среде.

- исследование зависимости амплитуд напряжений и деформаций от частоты в вязко-упругих цилиндрических оболочках при воздействии гармонических и нестационарных волн с учётом диссипации энергии, а также сравнительный анализ полученных результатов.

Объект исследования - Вязко-упругие двух- и трёхслойные цилиндрические оболочки.

Предмет исследования - Предметом исследования являются задачи оценки напряжённо-деформированного состояния длинной вязко-упругой двух- или трёхслойной цилиндрической оболочки при воздействии продольных или поперечных нестационарных волн с учетом влияния геометрических и физико-механических параметров оболочки.

Методы исследования - В исследовании использованы уравнения математической физики, а также применены методы интегральных преобразований (Фурье и Лапласа), метод замораживания, метод Мюллера и метод Гаусса.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- В процессе дифракции нестационарных волн на цилиндрическом теле, находящемся во вязкоупругой среде, впервые получена аналитическая формула зависимости напряжений и деформаций от времени, основанная на параметрах трёхпараметрического ядра Рязанцина–Колтунова с использованием интегрального преобразования Фурье.

- При уменьшении толщины слоёв установлено возрастание концентрации напряжений для относительно жёстких слоёв и уменьшение концентрации напряжений для мягких слоёв в определённом диапазоне.

- Под воздействием гармонических волн показано, что в двух- и трёхслойных цилиндрических оболочках, находящихся во вязкоупругой среде, динамическое напряжённо-деформированное состояние достигает максимальных значений при длинных волнах и низких частотах (до 10 Гц), что подтверждается дисперсионными соотношениями.

- В вязкоупругих цилиндрических оболочках при воздействии нестационарных (импульсных) волн выявлено, что динамические напряжения и деформации достигают максимальных значений в начальный момент времени, а затем асимптотически приближаются к статическим напряжениям и деформациям, при этом обнаружено существование интервалов немонотонного изменения, связанных с параметрами системы.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

- Разработаны методы расчета напряженно-деформированного состояния, возникающего в двух- и трехслойных цилиндрических оболочках с жидкостью под воздействием нестационарных волн.

- Разработаны методы расчета напряженно-деформированного состояния, возникающего в двух- и трехслойных цилиндрических оболочках с жидкостью под воздействием гармонических волн.

- Проведена сравнительная оценка напряженно-деформированного состояния, возникающего в двух- и трехслойных цилиндрических оболочках с жидкостью в результате продольного и поперечного нагружения.

Достоверность результатов исследования обоснована корректной постановкой краевых задач, строгим математическим обоснованием полученных выражений, применением обоснованных методов решения, оценкой точности решений, а также их сопоставлением с результатами, полученными другими учёными.

Научная и практическая значимость результатов исследования:

Разработанная методика и алгоритм определения дифракционных процессов, а также динамических напряжений и деформаций в многослойных цилиндрических оболочках, находящихся в вязкоупругой (диссипативно-неоднородной) среде, внесли значительный вклад в развитие теории волновой динамики деформируемого твёрдого тела.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что при воздействии сейсмических волн на подземные сооружения разработанные подходы позволяют учитывать вязкоупругие свойства материалов и тем самым совершенствовать методы расчёта их прочности.

Внедрение результатов исследования. На основе методики и алгоритма решения задач дифракции гармонических и нестационарных волн на вязкоупругой многослойной цилиндрической оболочке, а также полученных результатов:

- методы приближённого решения дифференциальных уравнений в частных производных с комплексными коэффициентами, направленные на сравнительную оценку динамического напряжённо-деформированного состояния многослойных неоднородных цилиндрических оболочек, были использованы в Институте механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан при выполнении инновационного проекта № ПЛ-21071166 «Создание ветротурбины с вертикальной осью, предназначенной для работы при низкой скорости ветра» (справка Института механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз от 24 января 2025 г., № 71-3). В результате создана возможность проверки корректности уравнений математической модели, разработанной с целью обеспечения эффективной работы ветротурбин.

- разработанная в диссертации методика решения дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка с неоднородными

коэффициентами была использована в Ташкентском химико-технологическом институте при выполнении в 2016–2020 гг. фундаментального проекта OT-F4-01 «Разработка методов исследования и развитие теории нелинейного динамического напряжённо-деформированного состояния многослойных композитных труб с криволинейными участками под воздействием температурных и динамических нагрузок при протекании вязкой жидкости» (справка Ташкентского химико-технологического института от 6 февраля 2025 г., № 1/01-358). В результате определено напряжённо-деформированное состояние композитных труб с цилиндрическим поперечным сечением, по которым течёт вязкая жидкость, под действием динамических нагрузок, а также выявлена возможность заблаговременного определения областей, в которых может возникнуть резонансное явление.

Апробация результатов исследования

Результаты данного исследования были обсуждены и одобрены на международных и республиканских конференциях, в частности, были представлены и обсуждены на 2 международных и 12 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования.

По теме диссертации опубликовано 24 научные работы. Из них 10 — в научных журналах, а 14 — в сборниках научных трудов и материалах различных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 114 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, а также его объект и предмет. Показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Раскрыты научная новизна и практические результаты исследования. Обоснована достоверность полученных результатов, освещена их научная и практическая значимость. Приведены сведения о внедрении результатов исследования в практику, апробации работы, опубликованных научных трудах, структуре и объеме диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной «**Анализ литературы по проблеме дифракции гармонических и нестационарных волн на вязкоупругой многослойной цилиндрической оболочке**», выполнен краткий анализ литературы, посвященной изучению напряжённо-деформированного состояния глубоко заложённых цилиндрических труб с различной формой поперечного сечения под воздействием гармонических и

нестационарных (временных) волн. На основе обзора литературы сформулированы соответствующие выводы.

Во второй главе диссертации, озаглавленной «**Математическая постановка задачи нагружения цилиндрических тел гармоническими и нестационарными волнами, методика решения и алгоритм**», изложены математическая формулировка задач волнового нагружения в многослойном цилиндрическом теле, а также подходы к их решению и соответствующие алгоритмы.

Все рассматриваемые системы предполагаются вязкоупругими и изотропными. Постановка задачи сводится к задаче плоской деформации в рамках теории упругости. Расчётная схема (см. рисунок 1) имеет следующий вид:

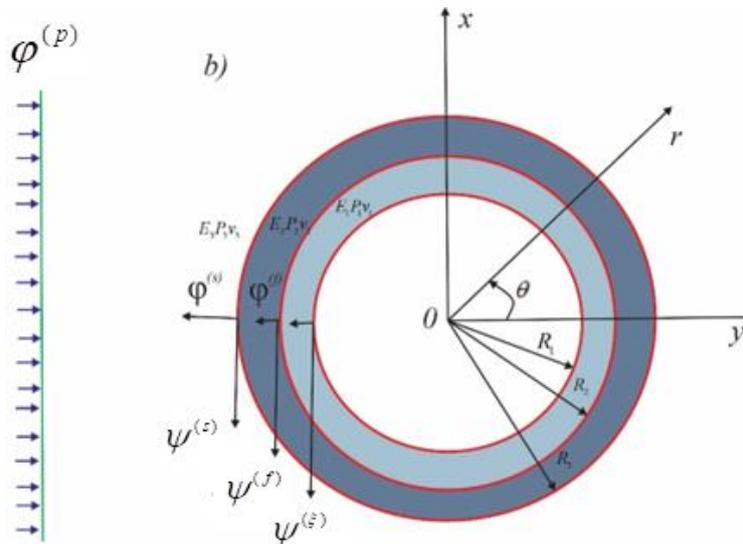


Рис. 1. Расчетная схема воздействия упругих волн на двухслойное тело.

Задача волнового нагружения многослойного цилиндрического тела в вязкоупругой среде описывается уравнением Ламе теории упругости:

$$\tilde{\mu}_n \nabla^2 \bar{u} + (\tilde{\lambda}_n + \tilde{\mu}_n) \text{grad div } \bar{u} = \rho_n \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2}. (n = 1, 2, 3, \dots, N.) \quad (1)$$

Если цилиндрические слои, расположенные в многослойной среде, тонкие, то удовлетворяют гипотезе Кирхгофа-Лява или Тимошенко:

$$L\bar{U} - L_0 \int_{-\infty}^t R_L(t-\tau) L\bar{U}(\tau) d\tau = \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0 h} \bar{p} + \rho_1 \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0} \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2} \right), \quad (2)$$

где $\tilde{\lambda}_j$ и $\tilde{\mu}_j$ - модули упругости в виде операторов

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

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

Здесь E_{01} - модуль Юнга; $\bar{u} = \bar{u}(u_r, u_\theta, u_z)$ - вектор перемещения средней поверхности оболочки (применимы гипотезы Кирхгофа-Лява), где $\bar{u}_j(u_{rj}, u_{\theta j}, u_{zj})$ - вектор перемещения, являющийся функцией r, θ, z, t ; p_j - плотность материала слоя; γ - плотность материала оболочки; $R_L(t-\tau)$ - ядро релаксации; λ_{oj}, μ_{oj} - модули мгновенной упругости слоя, E_{01} - модуль мгновенной упругости оболочки.

Если цилиндрическое сооружение состоит из нескольких слоёв, то его уравнения движения принимают вид (2). При этом накладываются следующие контактные и граничные условия:

1. Если в среде расположена цилиндрическая оболочка, то на контакте выполняется следующее граничное условие:

$$u_{r1} \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}} = U_r \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}}; \quad u_{\theta 1} \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}} = U_\theta \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}}; \quad u_{z1} \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}} = U_z \Big|_{r=R_0+\frac{h}{2}},$$

$$P_r = \sigma_{rr1}; \quad P_\theta = \sigma_{r\theta 1}; \quad P_z = \sigma_{rz1} \quad (3)$$

2. Если цилиндрическое тело состоит из слоев, то его уравнения движения имеют вид (1). Между слоями ставится условие жесткого закрепления или скольжения:

$$r = r_N: \quad \sigma_{rk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)}; \quad \sigma_{rk} = \sigma_{rz(k+1)}; \quad (4)$$

$$u_k = u_{k+1}; \quad \mathcal{G}_k = \mathcal{G}_{k+1}; \quad w_k = w_{k+1}.$$

3. Между слоями ставится условие скольжения (при отсутствии сопротивления между слоями)

$$r = r_N: \quad \sigma_{rm} = \sigma_{rr(n+1)}; \quad \sigma_{r\theta n} = \sigma_{rz n} = 0; \quad (5)$$

$$\sigma_{r\theta(n+1)} = \sigma_{rz(n+1)} = 0; \quad w_n = w_{n+1}.$$

4. Если первый слой без жидкости или наполнителя, то ставится условие отсутствия напряжений:

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

5. Если радиальная координата от сооружения стремится к бесконечности, то потенциал продольной и поперечной волн удовлетворяет условию поглощения Зоммерфельда:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r\varphi = const, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} - ik_1 \varphi \right) = 0,$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r\psi = const, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} - ik_2 \psi \right) = 0 \quad (7)$$

Рассматривается задача определения динамического напряжённо-деформированного состояния цилиндрической оболочки и окружающей её среды, возникающего под воздействием гармонических волн (см. рисунок 1). Предполагается, что на цилиндрическую оболочку воздействует одна из гармонических волн типа P, SH или SV :

$$\begin{aligned}\psi^{(p)} &= \Psi_0^{(p)} \sin \theta_0 e^{i\alpha(x-ct)} \sum_{n=1}^{\infty} E_n b_{n1} J_n(\delta_1 r) \sin n\theta, \varphi^{(p)} = 0, \chi^{(p)} = 0; \\ \varphi^{(p)} &= U_0^{(p)} e^{i\alpha(x-ct)} \sum_{n=1}^{\infty} E_n a_{n1} J_n(\gamma r) \cos k\theta, \psi^{(p)} = 0, \chi^{(p)} = 0; \\ \chi^{(p)} &= -X_0^{(p)} \sin \theta_0 e^{i\alpha(x-ct)} \sum_{n=0}^{\infty} E_n c_{n1} J_n(\delta_1 r) \sin k\theta, \varphi^{(p)} = 0, \psi^{(p)} = 0,\end{aligned}\quad (8)$$

где $\Psi_0^{(p)}, U_0^{(p)}, X_0^{(p)}$ - амплитуды падающих волн; J_n - цилиндрическая функция Бесселя первого рода.

При воздействии нестационарных волн нагружающее воздействие принимается в виде ступенчатой функции, зависящей от времени. Предполагается, что на границе оболочки или цилиндра действует напряжение, заданное во времени следующим образом:

$$\sigma_{xx}^{(p)} = \sigma_0 H(\hat{t}); \sigma_{yy}^{(p)} = \sigma_0 \frac{v_N}{1-v_N} H(\hat{t}), \quad (9)$$

где $H(\hat{t})$ - функция Хевисайда.

В составленных дифференциальных уравнениях с частными производными для заполненной цилиндрической оболочки и окружающей её среды вектор перемещений выражается через потенциалы продольных и поперечных волн, при этом применяются преобразования Грина–Лемба.

$$\vec{u} = \text{grad } \varphi + \text{rot } \vec{\psi}, \quad \text{rot } \vec{\psi} = 0, \quad (10)$$

где φ – потенциал продольных волн; $\vec{\psi}(\psi_r, \psi_\theta, \psi_z)$ - потенциал волны сдвига.

В системах цилиндрических координат векторы перемещений, деформаций и потенциалов перемещений выражаются следующим образом:

$$u_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_z}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi_\theta}{\partial z}; \quad u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \frac{\partial \psi_r}{\partial z} - \frac{\partial \psi_z}{\partial r}; \quad u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi_\theta}{\partial r} + \frac{\psi_\theta}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_r}{\partial \theta}; \quad (11)$$

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c_p^2 \Gamma_\kappa} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0; \quad \nabla^2 \psi_z - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_\kappa} \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial t^2} = 0; \quad \nabla^2 \psi_\theta - \frac{\psi_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_r}{\partial \theta} - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_\kappa} \frac{\partial^2 \psi_\theta}{\partial t^2} = 0,$$

$$\nabla^2 \psi_r - \frac{\psi_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_\theta}{\partial \theta} - \frac{1}{c_s^2 \Gamma_\kappa} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial t^2} = 0.$$

Рассматривается распространение продольных (поперечных) волн в диссипативных механических системах в плоских (или цилиндрических) телах. Решение задачи (11) находится в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n(\alpha_k r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pk} z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{rk}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{nr}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ -\cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pk} z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{\theta k}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{n\theta}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pk} z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{zk}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{nz}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ \cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pk} z} e^{-i\omega t}; \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где: n - целое число; γ_{pk} - волновое число распространения волны; ω - частота; $r = \frac{r_1}{a_0}$, $z = \frac{z_1}{a_0}$.

Найденные силы и напряжения подставляются в краевое условие, в результате чего получаем систему алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами вида (13), из которой определяются неизвестные величины $A_{nj}, B_{nj}, C_{nj}, L_{nj}, M_{nj}, Z_{nj}$ ($j=1, 2, \dots, N$)

$$[C]\{q\} = \{P\}. \quad (13)$$

где: $\{q\} = [A_{n1}, B_{n1}, C_{n1}, L_{n1}, M_{n1}, Z_{n1}, \dots, A_{nN}, B_{nN}, C_{nN}, L_{nN}, M_{nN}, Z_{nN}]^T$,

$\{P\} = [P_{1N}, P_{2N}, P_{2N}, P_{3N}, \dots, 0, 0]^T$ - матрица внешних нагрузок, $[C]$ — квадратная матрица размером $(4N * 4N)$. Данная система алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами решается методом последовательного исключения неизвестных, известным также как метод Гаусса. Для решения нестационарных задач применяется метод интегрального преобразования Фурье, а обратное преобразование Фурье выполняется численно с использованием метода Ромбера.

В третьей главе диссертации, озаглавленной «Дифракция гармонических волн в вязко-упругом многослойном цилиндрическом теле», рассматривается задача дифракции гармонических волн в цилиндрической оболочке. Проблема решается с использованием потенциалов смещений. Разработаны метод решения и соответствующий алгоритм, а также проведено сравнение результатов расчётов для зон действия гармонических (или сейсмических) волн в соответствии с сейсמודинамической теорией, разработанной академиками А.А. Илюшиным и Т.Р. Рашидовым.

Исследуемые задачи сведены к плоской постановке в рамках теории упругости. Для определения напряжённо-деформированного состояния слоя и оболочки под воздействием плоских гармонических волн смещения и напряжения выражаются в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_{\theta}}{\partial \theta}, u_{\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi_{\theta}}{\partial r}; \\ \frac{1}{2\mu} \sigma_{rr} &= \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \alpha^2 \varphi + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{1}{2\mu}\sigma_{\theta\theta} = \frac{-\nu}{(1-2\nu)}\alpha^2\varphi + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\theta^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial\theta} - \frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial\theta}\right) \quad (15)$$

$$\frac{1}{2\mu}\sigma_{r\theta} = \frac{1}{2}\beta^2\psi + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\theta^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial\theta} - \frac{\partial^2\psi}{\partial r\partial\theta}\right).$$

Потенциалы продольных волн ищутся в следующем виде:

$$\varphi_1^{(p)} = \varphi_0 \sum_{n=0}^{\infty} (E_n i^n J_n(\alpha_1 r) \cos(n\theta)) e^{-i\omega t}, \quad (16)$$

где $E_n = \{1, n=0; 2, n \geq 1\}$.

Потенциалы волн, отражённых от оболочек, ищутся в следующем виде.

$$\begin{pmatrix} \varphi^{(s)} \\ \varphi^{(f)} \\ \varphi^{(\xi)} \end{pmatrix} = e^{i\omega t} \sum_{n=0}^{\infty} \cos(n\theta) \begin{cases} A_n H_n^{(1)}(\alpha_1 r), & r \geq c, \\ C_n H_n^{(1)}(\alpha_2 r) + D_n H_n^{(2)}(\alpha_2 r), & \text{где } b \leq r \leq c, \\ C_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r), & \alpha \leq r \leq b, \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} \psi^{(s)} \\ \psi^{(f)} \\ \psi^{(\xi)} \end{pmatrix} = e^{i\omega t} \sum_{n=0}^{\infty} \sin(n\theta) \begin{cases} B_n H_n^{(1)}(\beta_1 r) & r \geq c, \\ L_n H_n^{(1)}(\beta_2 r) + M_n H_n^{(2)}(\alpha_2 r) & \text{где } b \leq r \leq c, \\ F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) & \alpha \leq r \leq b, \end{cases} \quad (18)$$

где $\alpha_j^2 = \frac{\omega^2}{C_{pj}}$, $\beta_j^2 = \frac{\omega^2}{C_{pj}}$, ($j=1,2,3$). - волновое число соответствующих

внешнего и внутреннего слоев.

Произвольные константы $A_n, B_n, C_n, D_n, L_n, M_n$ определяются из граничных условий. Подставляя перемещения и напряжения (17) в граничные условия, получаем систему комплексных алгебраических уравнений вида;

$$[C_n]\{q_n\} = \{P_n\}, \quad (19)$$

Здесь $[C_n]$ — квадратная комплексная матрица, а $\{P_n\}$ — вектор-столбец внешних нагрузок. При условии скользящего контакта (5) элементы системы комплексных алгебраических уравнений (19) принимают следующий вид:

$$C(1,3) = C(1,2) = P(1) = 0, \quad C(3,1) = C(3,2) = P(3) = 0. \quad (20)$$

Оставшиеся элементы матрицы (19) остаются без изменений. Система комплексных алгебраических уравнений (19) решается на компьютере методом Гаусса с выбором главного элемента, в результате чего находятся неизвестные коэффициенты $A_n, B_n, C_n, D_n, L_n, M_n$. Подставляя найденные значения $A_n, B_n, C_n, D_n, L_n, M_n$ в выражения (18) и (19), определяются силовые факторы среды, слоя и оболочки.

Перемещения и напряжения во внешнем цилиндрическом слое окружающей среды остаются такими же, но во внутреннем слое они имеют следующий вид:

$$U_{\theta}^{\xi} = \sum_{n=0}^{\infty} \left[G_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right] + \left[F_n H_n^{(1)}(\beta_2 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) \right] \sin(n\theta) e^{-i\omega t},$$

$$U_r^\xi = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\beta(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right] + \frac{n}{r} \left[F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) \right] \cos(n\theta) e^{-i\omega t}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{r\theta}^{(\xi)} = & \sum_{n=0}^{\infty} \zeta_\xi p \frac{1}{2} \beta_3 \left(F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) \right) + \frac{1}{p} F_n H_n^{(1)' }(\beta_3 r) Z_n H_n^{(2)' }(\beta_3 r) - \\ & - \frac{n^2}{p} \left(F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) \right) + \frac{n}{p} \left(G_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right) - \\ & n \left(G_n H_n^{(1)' }(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)' }(\alpha_3 r) \right) \sin(n\theta) e^{-i\omega t}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{(\xi)} = & \sum_{n=0}^{\infty} \zeta_\xi p \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \alpha_3^2 \left(G_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right) + \frac{1}{r} G_n H_n^{(1)' }(\alpha_3 r) + \\ & Q_n H_n^{(2)' }(\alpha_3 r) - \frac{n^2}{r} \left(G_n H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + Q_n H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right) + \frac{n}{r} \left(F_n H_n^{(1)}(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)}(\beta_3 r) \right) - \\ & n \left(F_n H_n^{(1)' }(\beta_3 r) + Z_n H_n^{(2)' }(\beta_3 r) \right) \cos(n\theta) e^{-i\omega t}, \end{aligned}$$

где $\zeta_{\xi p} = \frac{\mu_\xi}{\mu_p}$, μ_ξ – коэффициент Ламе внутреннего слоя.

По результатам проведённых расчётов получены следующие численные данные.

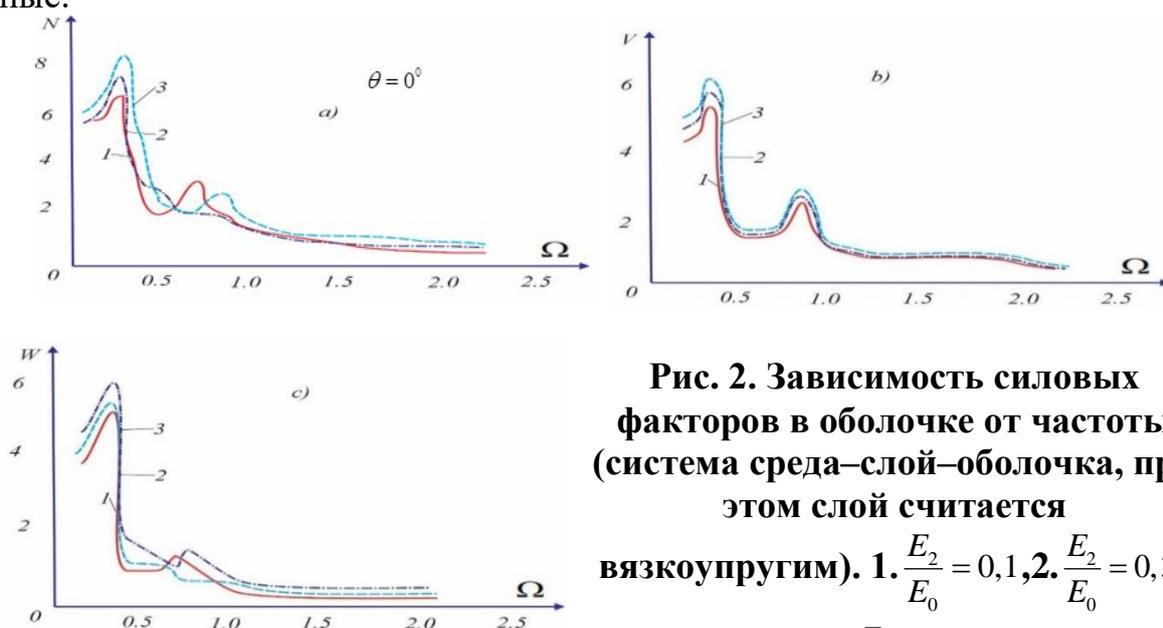


Рис. 2. Зависимость силовых факторов в оболочке от частоты (система среда–слой–оболочка, при этом слой считается вязкоупругим). 1. $\frac{E_2}{E_0} = 0,1$, 2. $\frac{E_2}{E_0} = 0,3$, 3. $\frac{E_2}{E_0} = 0,4$.

Анализ графиков показывает, что в результате взаимодействия оболочки и среды индуцируемые в среде напряжения уменьшают уровень напряжений в оболочке на 20–25%. Данное явление свидетельствует о тормозящем воздействии среды на деформации, а также о поглощении частью энергии волн именно средой. Особенно заметна разница в амплитудах напряжений в зоне интерфейса при воздействии нагрузок высокой частоты.

На рисунках 3 и 4 приведены численные результаты для случая, когда окружающая среда считается вязко-упругой и чисто упругой. Проведённые исследования показывают, что с учётом вязкости среды можно значительно снизить контурные напряжения. Как видно из рисунка 4, зависимость

величины $\sigma_{\theta\theta}^*$ от волнового числа аналогична упругому случаю, однако максимальное значение $\sigma_{\theta\theta}^*$ для вязко-упругой среды примерно на 10–15% ниже.

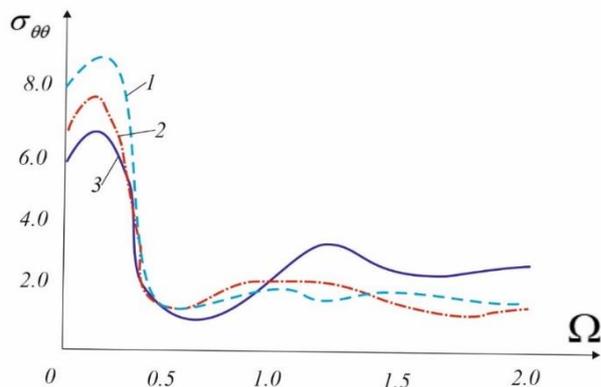


Рис. 3. Зависимость контурного напряжения от волнового числа и коэффициента Пуассона среды (Ω – волновое число):

1. $\nu = 0.15$; 2. $\nu = 0.25$; 3. $\nu = 0.35$

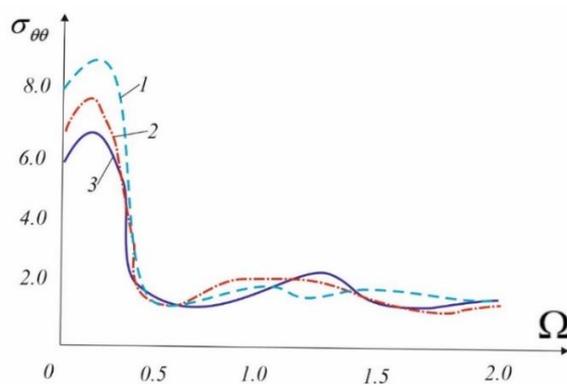


Рис. 4. Зависимость контурного напряжения от волнового числа (среда — вязкоупругая).

На рисунках 5 (а, б, с) показана частотная зависимость коэффициентов напряжений в системе, состоящей из вязкоупругой среды, промежуточного слоя и цилиндрической оболочки. Графики отражают динамический отклик системы «среда–слой–оболочка» на воздействие гармонических волн. Результаты демонстрируют, что значения напряжений при разных частотах существенно различаются, что напрямую связано с резонансными явлениями и процессами диссипации энергии.

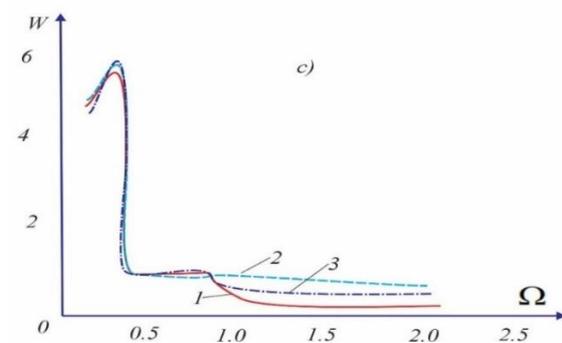
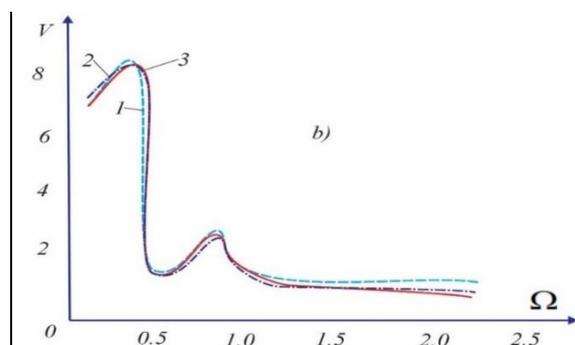
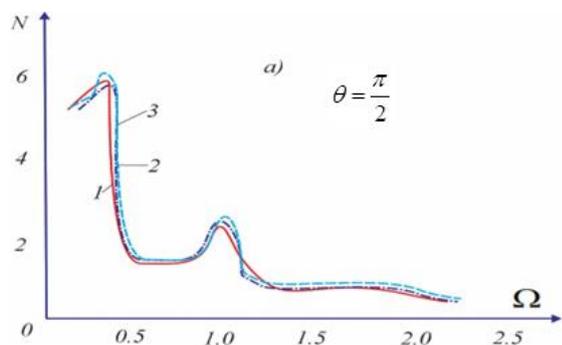


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициентов напряжений в оболочке (промежуточный слой — вязкоупругий). 1. $\frac{E_2}{E_0} = 0,1$, 2. $\frac{E_2}{E_0} = 0,3$, 3. $\frac{E_2}{E_0} = 0,4$

При этом приняты следующие значения параметров: $\frac{R_1}{R_0} = 1, 2$, где R_1 - внешний, а R_0 - внутренний радиусы слоя; $\frac{E_1}{E_0} = 0.4$, $\frac{\rho_1}{\rho_0} = 0.156$, $\nu_0 = \nu_1 = 0.25$, E_0, ρ_0, ν_0 - Параметры упругости слоя, E_1, ρ_1, ν_1 - Параметры упругости среды.

На рисунках 6 (а, б) показано изменение контурных и радиальных напряжений в зависимости от частоты в системе, представляющей собой двухслойную цилиндрическую оболочку (среда-слой-слой-вязкоупругая оболочка). Как видно из графиков, компоненты напряжений изменяются скачкообразно в отдельных диапазонах частот. Особенно примечательно наличие локальных максимумов, что свидетельствует о возможных резонансных явлениях в системе.

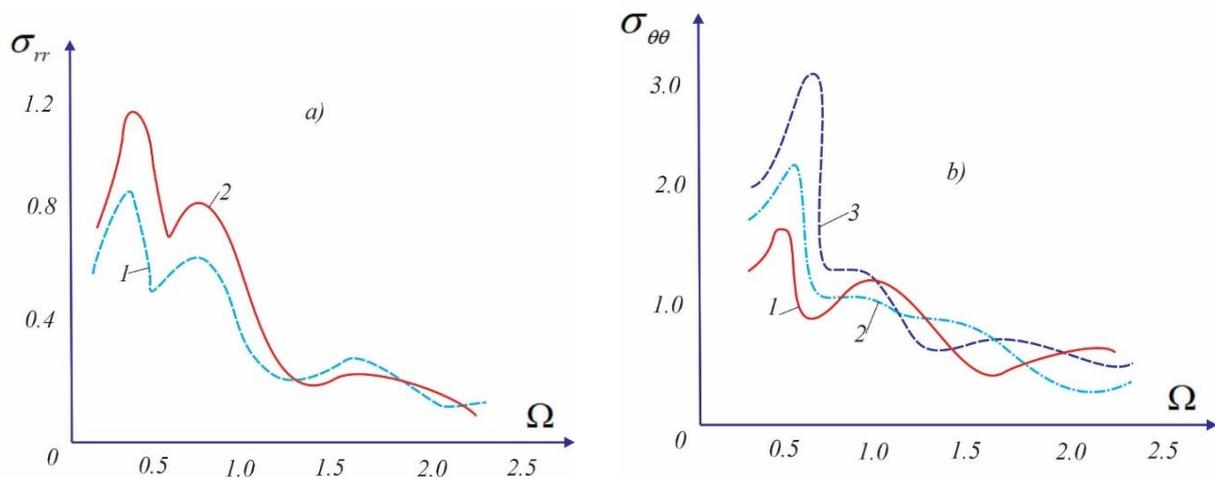
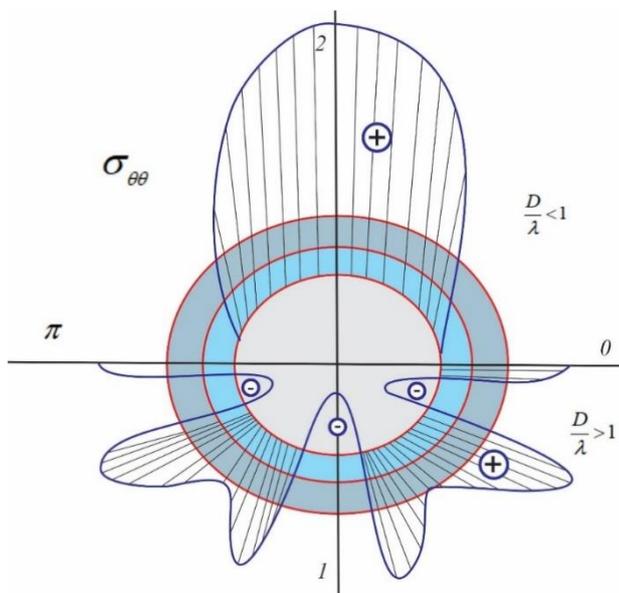


Рис. 6. Изменение контурных и радиальных напряжений в двухслойной цилиндрической оболочке в зависимости от частоты (среда – вязкоупругий слой).



На рисунке 7 представлена эпюра распределения контурных напряжений при длинных и коротких длинах волн. Из графиков видно, что компоненты напряжений в системе при увеличении частоты изменяются резко в определённых диапазонах. Особенно заметно наличие локальных максимумов напряжений при некоторых частотах, что указывает на потенциальную возможность возникновения резонансных явлений.

Рис. 7. Эпюра распределения контурных напряжений при длинных и коротких длинах волн.

В четвертой главе диссертации, озаглавленной «Взаимодействие нестационарных волн с цилиндрическими телами, расположенными в упругой среде», представлены математическая постановка задачи, методика её решения и алгоритм расчёта. Также приведены численные результаты и сформулированы выводы. Первый параграф главы — «Постановка задачи, методика решения и алгоритм расчёта» — включает в себя соответствующее описание математической модели, метода решения и вычислительного алгоритма.

Предположим, что в бесконечной упругой среде расположен упругий цилиндр без внутреннего пустого пространства (рисунок 1). На многослойный цилиндр падают нестационарные волны напряжения $\sigma_{xx}^{(i)}$ и $\sigma_{yy}^{(i)}$, передний фронт которых параллелен продольной оси цилиндра. Требуется определить динамическое напряженно-деформированное состояние цилиндра и окружающей его среды под воздействием падающего импульса напряжения.

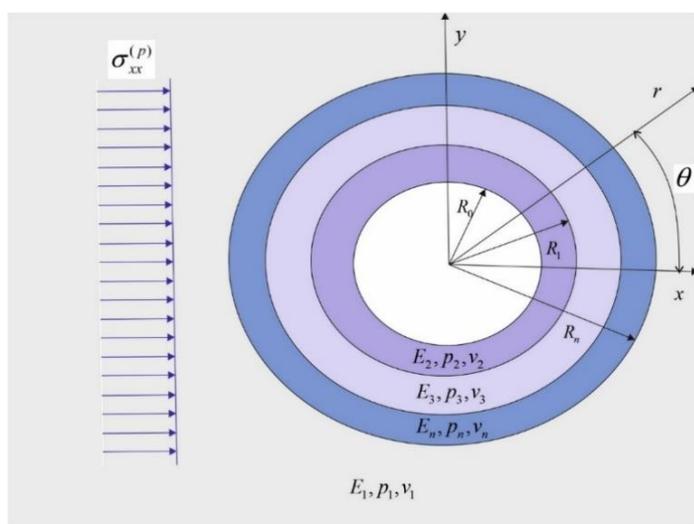


Рис. 8. Схема расчёта взаимодействия нестационарных волн с цилиндрическим телом, расположенным в упругой среде.

Пусть нестационарная волна, падающая на цилиндрическую оболочку, имеет вид (9).

Начальные условия выразим в следующем виде:

$$\left. \frac{\partial \varphi_j}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j}{\partial \theta} \right|_{t=0} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \varphi_j}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j}{\partial \theta} \right]_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_j}{\partial \theta} - \frac{\partial \psi_j}{\partial r} \right|_{t=0} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial \psi_j}{\partial \theta} + \frac{\partial \psi_j}{\partial r} \right]_{t=0} = 0, \quad (23)$$

где: $j = 1, 2, \dots, N, N-1$ - количество цилиндрических слоев, $j = N$ - окружающая среда.

Для решения вышеуказанной задачи применяется интегральное преобразование Фурье по времени:

$$f^F(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\Omega t} dt, \quad f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f^F(\Omega) e^{i\Omega t} d\Omega. \quad (24)$$

Применяя начальные условия (23) и используя интегральное преобразование Фурье (24), при условии $R_{\lambda_j} = R_{\mu_j} = 0$ получаются следующие уравнения Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 \varphi_j^F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j^F}{\partial r} + \left(\frac{\Omega^2}{c_{pj}^2} - \frac{n^2}{r^2} \right) \varphi_j^F = 0 \quad \frac{\partial^2 \psi_j^F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_j^F}{\partial r} + \left(\frac{\Omega^2}{c_{sj}^2} - \frac{n^2}{r^2} \right) \psi_j^F = 0. \quad (25)$$

Падающий импульс (4.1) приводится к следующему виду:

$$\sigma^{(p)} = \sigma_0 H(\hat{t} - x) = \frac{\sigma_0}{\Omega} e^{i \frac{\Omega}{c_p} (R_0 - r \cos \theta)}. \quad (26)$$

Переходя к полярным координатам, получаем следующее:

$$\sigma_{rr}^{(p)} = \frac{\sigma_0}{i\Omega} \sum_{n=0}^{\infty} E_n t^{n-1} J_n \left[\frac{\Omega}{C_p} r \right] \cos(n\theta), \quad (27)$$

Где Ω — параметр интегрального преобразования Фурье, $\varphi_j^F(\Omega)$ — преобразования Фурье функций $\varphi_j(t)$ соответственно.

Также решения уравнений (26) и (27) выражаются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \varphi_j^F(r, \theta, \Omega) \\ \psi_j^F(r, \theta, \Omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_j^F(r, \Omega) \\ \psi_j^F(r, \Omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(n\theta) \\ \sin(n\theta) \end{bmatrix}, \quad (28)$$

где

$$\Phi_j^p(r, \Omega) = \begin{cases} A_{nN} H_n^{(1)}(\Omega r / c_{pN}) & r \geq r_N, \\ A_{nj} H_n^{(1)}(\Omega r / c_{pj}) + B_{nj} H_n^{(2)}(\Omega r / c_{pj}) & \text{если } r_0 \leq r \leq r_N \quad (j=1, 2, \dots, N-1) \\ A_{n0} J_n(\Omega r / c_{p0}) & 0 \leq r \leq r_0; \end{cases} \quad (29)$$

$$\psi_j^F(r, \Omega) = \begin{cases} L_{nN} H_n^{(1)}(\Omega r / c_{pN}) & r \geq r_N, \\ L_{nj} H_n^{(1)}(\Omega r / c_{pj}) + M_{nj} H_n^{(2)}(\Omega r / c_{pj}) & \text{если } r_0 \leq r \leq r_N \quad (j=1, 2, \dots, N-1). \\ L_{n0} J_n(\Omega r / c_{p0}) & 0 \leq r \leq r_0 \end{cases} \quad (30)$$

Подставляя выражения (29) и (30) в решение уравнения (31), получаем соответствующие напряжения и перемещения в виде формулы (20). При этом единственное ненулевое напряжение — это контурное напряжение, которое выражается следующим образом:

$$\sigma_{\theta\theta}^F(r, \theta, \Omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \zeta_{\xi P} \left[\frac{\nu}{1-2\nu} \alpha_3^2 G_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\alpha_3 r) + \frac{1}{r} \left[G_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\alpha_3 r) - \frac{n^2}{r} F_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\alpha_3 r) \right] + \right. \\ \left. + \frac{n}{r} \left(F_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\beta_3 r) - n F_n^{(\Omega)} H_n^{(1)}(\beta_3 r) \right) \right] \cos(n\theta). \quad (31)$$

Применяя (26), запишем оригинал этой функции:

$$\sigma_{\theta\theta}(r^*, \theta^*, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{\theta\theta}^F(r^*, \theta^*, \Omega) e^{-i\Omega\tau} d\Omega. \quad (32)$$

Численные результаты получены при параметрах $\nu = 0.25$; $\frac{C_p}{C_a} = 0.5$; $\theta = 0^\circ, 90^\circ$.

При вычислении интеграла (32) пределы интегрирования ω_a и ω_b выбирались следующим образом: $\omega_a = 10^{-4} N$, $N = 1, 2, 3, 4, 5$, а шаги интегрирования принимались равными $h = 0.1$; 0.01 ; 0.001 . Для значений $N = 5$ и $N = 6$ значения контурного напряжения изменяются очень мало, начиная с пятого знака после запятой. Зависимости изменения напряжения

$\sigma_{\theta\theta}$ от параметра τ при различных $n = 1, 2, 3, 4, 5$ и углах $\theta = 0^\circ, \pi/2$ приведены в работе. Полученные численные результаты были сопоставлены с известными данными Рао У.Н. и Мов С.С.. Ошибка при шаге $h = 0.1$ составила до 30%, при этом максимальное контурное напряжение при $h = 0.01, \theta = 90^\circ$

оказалось равным $\frac{2.962}{3.0}$, в то время как согласно Рао У.Н. и Мов С.С. оно равно $\frac{3.28}{3.0}$ ($\tau = 4.71$). Рассмотрим взаимодействие нестационарных волн (уравнение (22)) с двухслойным цилиндрическим телом (оболочкой) ($J = 1, 2$). Предполагается, что внутренний предел ($r = r_0$) свободен от напряжений, а на границе взаимодействия с окружающей средой выполняется условие равенства перемещений и напряжений (уравнение (21)). Задача решается по переменной t^* с помощью преобразования Фурье.

Для управления алгоритмом разработан метод, позволяющий численно вычислять интегралы вида (32). Результаты вычислений представлены на рисунках 9 и 10, где $\theta = 0^\circ, 90^\circ$, а параметры принимаются равными: ($v_1 = 0.2, v_2 = 0.25, \frac{r_0}{r_1} = 0.5, \frac{E}{E_1} = 0.1; 0.5, \eta = 0.1$). Сравнение полученных результатов с работами Рао У.Н. и Мов С.С. показало расхождение не более 10%. Аналогичные результаты были получены и для цилиндрических оболочек в упругой среде. Для управления алгоритмом также разработан специальный метод, позволяющий численно вычислять интегралы вида (32). Полученные численные результаты сопоставлены с данными Рао У.Н. и Мов С.С. где пределы интегрирования выбирались как $\omega_a = 10^{-4}, \omega_b = 2 \cdot 10^{-4}$. В этом случае наши результаты отличаются от результатов Рао У.Н. и Мов С.С. до 20%.

На рисунке 9 представлено изменение контурного напряжения $\sigma_{\theta\theta}^*(\theta = 90^\circ, r = \frac{r_0 - r_1}{2}; r = r_1)$ во времени (t). Разность напряжений между внешней и внутренней поверхностями составляет от 15% до 18%, тогда как разность между средней и внутренней поверхностями достигает 10% при $\frac{r_0}{r_1} = 0.5$.

Расчёты показывают, что с течением времени, при $t = \frac{120}{c_p}$, результаты

настоящего исследования стремятся к точному статическому значению

$$\sigma_{\theta\theta}^* = 8.13, \text{ приведенному в работах Б.С. Рахмонова и И.И. Сафарова.}$$

На рисунке 10 показано изменение контурного напряжения на свободной поверхности во времени. На рисунке 11 приведена эпюра контурного напряжения на свободной поверхности двухслойного цилиндрического тела при фиксированном моменте времени.

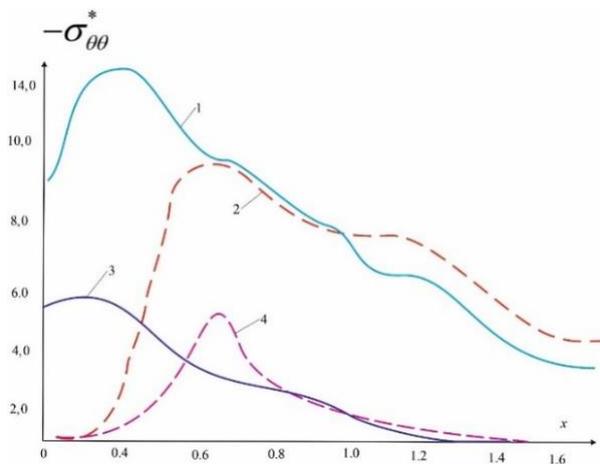


Рис. 9. Зависимость контурного напряжения от времени.

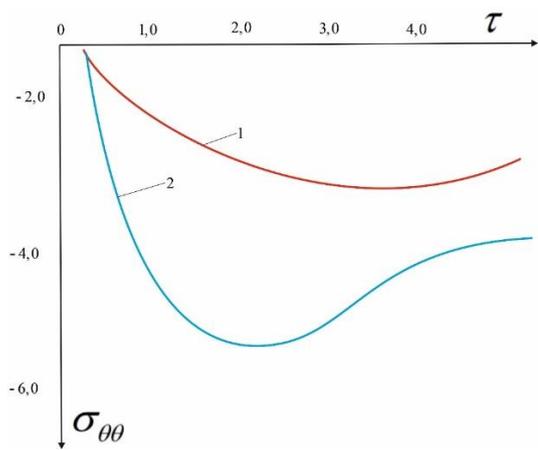


Рис. 10. Зависимость контурного напряжения от времени.

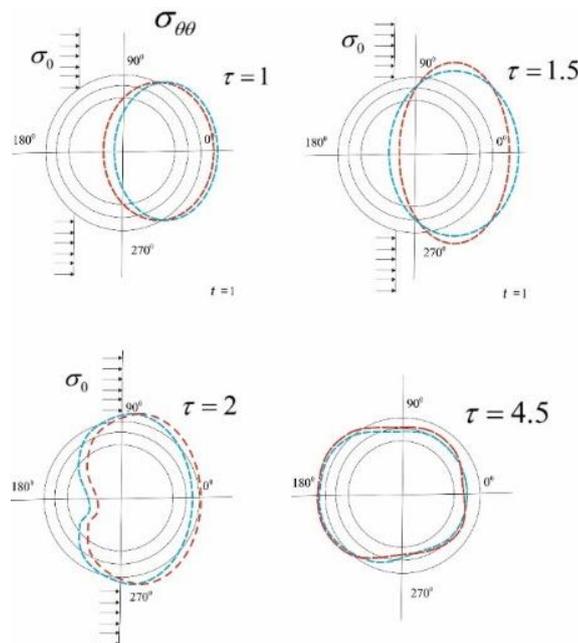


Рис. 11. Эпюра контурного напряжения по времени.

На рисунке 11 представлены изменения кольцевого напряжения на средней поверхности двухслойного цилиндрического тела в моменты времени 1, 1.5, 2 и 4 секунды. Анализ графиков и эпюр показывает, что в начальной фазе наблюдается растяжение, а с течением времени — переход к сжатию. Также видно, что напряжения достигают максимального значения в начальный момент времени.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Постановлена задача исследования процессов дифракции гармонических и нестационарных волн в многослойных цилиндрических оболочках под воздействием упругих и вязко-упругих волн. Разработаны необходимые теоретико-методологические основы и алгоритм расчётов для решения данной задачи.

2. На основе предложенного алгоритма и программного обеспечения определены максимальные напряжения, возникающие под действием гармонических продольных и поперечных волн в многослойных цилиндрических оболочках, расположенных во вязко-упругой среде, в области длинных волн ($D/\lambda < 1$). Установлено, что увеличение числа слоёв влияет на напряжённо-деформированное состояние среды не более чем на 10%, что свидетельствует о высокой устойчивости слоистых структур к волновому воздействию.

3. Результаты расчётов показали, что максимальные напряжения возникают на внутреннем контуре слоя ($r = a$). Эти напряжения представляют собой контурные напряжения, величина которых превышает значения статических напряжений на 15%.

4. При уменьшении толщины слоя для относительно жёстких материалов наблюдается увеличение концентрации напряжений. В то же время, для мягких слоёв в диапазоне $0.3 \leq D/\lambda \leq 0.45$ отмечено обратное явление — снижение концентрации напряжений. При воздействии продольной волны максимальные контурные напряжения возникают под углами 90° и 270° , а при поперечной волне — под углами 45° и 135° .

5. Установлено, что расхождение между численными результатами, полученными на основе теории оболочек и уравнений Ламе, может достигать до 15%. Учёт вязкости среды позволяет снизить концентрацию напряжений до 10%, что подтверждает значимость вязкоупругих свойств при динамических нагрузках.

6. Разработана методика и алгоритм численного анализа динамических процессов, возникающих в оболочке и окружающей среде под воздействием нестационарных волн. Методика основана на интегральном преобразовании Фурье, а также численных методах интегрирования Гаусса и Ромберга. Результаты расчётов показали, что максимальные значения напряжений достигаются в начальный момент времени.

7. Анализ численных результатов показывает, что в вязкоупругом состоянии контурные силы оболочки значительно меньше упругих сил.

8. При анализе длинных волн перемещения рассчитаны с точностью 10^{-8} при очень больших или очень малых напряжениях. Установлено, что с увеличением волнового числа перемещения и напряжения уменьшаются.

**BUKHARA STATE TECHNICAL UNIVERSITY SCIENTIFIC COUNCIL
AWARDING ACADEMIC DEGREES No. PhD.03/27.02.2021.FM.101.**

TASHKENT INSTITUTE OF CHEMICAL TECHNOLOGY

CHORIEV MIRJALOL

**DIFFRACTION OF HARMONIC AND NONSTATIONARY WAVES BY A
MULTILAYER VISCOELASTIC CYLINDRICAL SHELL**

01.02.04 – Mechanics of Deformable Solids

**ABSTRACT OF THE DISSERTATION FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF
PHILOSOPHY (PhD) IN PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Bukhara–2025

The theme of the dissertation for Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences was registered under 2024.4.PhD/FM964 by the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan

This dissertation has been prepared at the Tashkent Institute of Chemical Technology.

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

Scientific supervisor: **Safarov Ismoil Ibrohimovich,**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Ibrohim Mirzayev,**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Ismoilov Kubaymurat,
Doctor of Technical Sciences, Professor

Leading organization: **Namangan State Technical University**

The defense of the thesis will take place on 4 october 2025 at 11:³⁰ o'clock at a meeting of the Scientific Council Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 at the Bukhara State Technical University at the address: 200100, Bukhara, st. K. Murtazayev, 15. Phone: (+99865) 223-78-84; fax: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz.

The dissertation can be found at the Information resource center of the Bukhara State Technical University (registered under the number No471). (Address: Bukhara region, 200100, Bukhara, K. Murtazaev st., 15. Phone: (+99895) 604-44-70).

Abstract of dissertation sent out on 20 september 2025 year

(mailing report №4 on 9 august 2025 year)



M.Kh. Teshayev

Chairman of the Scientific Council for awarding academic degrees, Dr.Sc. (DSc) in Physics and Mathematics

R.A. Sabirova

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

Z.I. Boltaev

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

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

Relevance and Necessity of the Dissertation Topic One of the most pressing global issues is ensuring the seismic resistance of underground structures constructed in seismically active regions. Therefore, significant attention is being paid to the study of stresses and deformations arising in underground structures under the influence of explosions and seismic waves, as well as to the diffraction of such waves. In this regard, one of the key challenges is the prevention of resonance phenomena that occur in various structural elements of modern underground facilities under dynamic loading conditions. To design next-generation structures, it is necessary to investigate wave propagation and diffraction processes within them, as well as to optimize structural solutions so that the resulting stresses and deformations do not exceed permissible limits.

Globally — particularly in industrially developed countries such as the USA, Germany, Russia, and China — considerable attention is devoted to improving the strength and reliability of engineering structures and developing modern mathematical models and efficient numerical methods that take wave effects into account. The study of wave propagation and diffraction processes and their impact on structures is a key area in ensuring their durability and safety.

In the Republic of Uzbekistan as well, construction technologies are actively evolving. Special attention is being given to ensuring the reliability of underground structures and engineering networks under various dynamic loading conditions. Therefore, research focused on the effects of wave phenomena, taking local conditions into account, and the development of modern scientific and applied approaches holds high scientific and practical importance.

This research contributes, to a certain extent, to the implementation of tasks set forth in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-144 dated May 30, 2022, “On Measures to Further Improve the Seismic Safety System in the Republic of Uzbekistan” [1]; the Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-158 dated May 16, 2023, “On Additional Measures to Further Improve the Seismic Safety System for the Population and Territories of the Republic of Uzbekistan” [2]; and the Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-161 dated April 17, 2024, “On Measures to Improve the Seismic Resistance of Buildings and Structures and to Enhance Seismic Hazard Monitoring Activities” [3], as well as other regulatory documents in the relevant fields.

Compliance of the Research with the Priority Areas of Science and Technology Development in the Republic of Uzbekistan

This dissertation research has been carried out within the framework of the fourth priority area for the development of science and technology in the Republic of Uzbekistan: “*Mathematics, Mechanics, Seismic Dynamics of Structures, and Computer Science.*”

Degree of Problem Study

The problems of the influence of seismic waves on multilayer cylindrical shells have been widely addressed in the works of numerous prominent foreign

scientists, including A.A. Ilyushin, E.I. Shemyakin, White, J.D. Achenbach, I.E. Troyanovsky, L.I. Slepyan, N.N. Fotiyeva, N.S. Bulichev, and others. Significant contributions have also been made by Uzbek scientists such as M.T. Urazbaev, T.Sh. Shirinkulov, Kh.A. Rakhmatulin, V.K. Kabulov, T.R. Rashidov, Ya.N. Muborakov, B.M. Mardonov, K.S. Sultanov, Sh.M. Mamadkulov, M.M. Mirsaidov, I. Mirzaev, G'.Kh. Khozhmetov, A.A. Ishanhojayev, T.M. Mavlonov, A.A. Abdusattorov, I.I. Safarov, Kh.Kh. Khudoynazarov, Sh.S. Yuldashev, S.A. Abduqodirov, among others. They developed effective methods for determining parameters that account for the rheological properties of materials when assessing the dynamic characteristics of cylindrical and spherical bodies.

Purpose of the research. The aim of the research is to develop the mathematical formulation, solution methodology and algorithms of the problems of loading multilayer cylindrical shells located in a viscoelastic medium by longitudinal or transverse (harmonic or non-stationary) waves, as well as to obtain and analyze numerical results.

Scientific novelty of the research.

For the first time, in the process of non-stationary wave diffraction on a cylindrical body in a viscoelastic medium, an analytical formula describing the time-dependent change of stresses and deformations, which depends on the parameters of the three-parameter Ryazanov–Koltunov kernel, was obtained on the basis of the Fourier integral transform.

It was found that when the layer thickness decreases, the concentration of stresses increases for relatively stiff layers, while for soft layers the concentration of stresses decreases in a certain range.

Under the influence of harmonic waves, it was shown that in two- and three-layer cylindrical shells located in a viscoelastic medium, the dynamic stress–strain state reaches its maximum values at long wavelengths and low frequencies (up to 10 Hz), which is confirmed by dispersion relations.

In viscoelastic cylindrical shells, under the action of non-stationary (impulsive) waves, dynamic stresses and deformations reach their maximum values at the initial stage of time, and then asymptotically approach static stresses and deformations; moreover, the existence of intervals of non-monotonic changes depending on system parameters has been established.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Axmedov Sh.R., Kulmurotov N.R., Safarov U.I., Choriev M., Hamraev N.N. Vibrations of deformable cylindrical shells with a viscoelastic filler // *Theoretical & Applied Science*. – Philadelphia, USA, 2021. – P. 178–186. <http://T-Science.org> (IF=1,582).

2. Чориев М. Пространственная задача взаимодействия продольных волн цилиндрической полости в упругой среде // *Science and Innovation International Scientific Journal*. – 2022. – Vol. 1. – Issue 5. – P. 306–311. UIF=8,2, ISSN: 2181-3337. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7064117> (IF=8,2).

3. Safarov U.I., Choriev M. Portlash yuklanishlarining ta'siriga balka nazariyasi asosida himoya inshootlarini hisoblash // *Ilm sarchashmalari ilmiy-nazariy, metodik jurnal*. – Urganch, 2023. – №5/1. – B. 11–17. (01.00.00, №12).

4. Rakhmanov B., Akhmedov Sh., Choriev M., Karimov I., Uralov U. Non-axisymmetric problems of unsteady deformation of cylindrical shells with filler // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 419. – 01001. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341901001> (IF=0,78).

5. Ishmamatov M., Kulmurotov N., Kuldashov N., Choriev M., Axmedov N. Fluctuations of the ground surface at blasting operations on tunnel structures // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 417. – 06004. GEOTECH-2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341706004> (IF=0,78).

6. Ablokulov Sh.Z., Choriev M. Vibrations of the ground surface at blasting works on the construction of tunnels // *Science and Innovation International Scientific Journal*. – 2023. – Vol. 2. – Issue 10. – P. 1–9. UIF=8,2, ISSN: 2181-3337. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10041298> (IF=8,2).

7. Kuldashov N.U., Nuriddinov B.Z., Choriev M., Ruzimov A.Sh., Xalilov Sh.F. Diffraction of acoustic harmonic waves in a viscoelastic cylinder // *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. – 2023. – Vol. 71. – Issue 8. – P. 421–427. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I8P236>. ISSN: 2231–5381. (IF=2,45).

II bo'lim (II часть; Part II)

9. Kuldashov N.U., Choriev M., Urolov U.A. Spatial problem of interaction of longitudinal (P) waves on a cylindrical cavity in an elastic medium // *Science and Innovation International Scientific Journal*. – 2023. – Vol. 2. – Issue 5 (May). – P. 201–210. UIF=8,2, ISSN: 2181-3337.

10. Choriev M., Urolov U.A., Eliboyev N.R., Umirov Sh.B. Checking the strength of reinforced concrete structures // *Science and Innovation International Scientific Journal*. – 2024. – Vol. 3. – Issue 10 (October). – P. 148–152. ISSN: 2181-3337. <https://doi.org/10.5281/zenodo>

11. Кулдашов Н.У., Чориев М. Пространственная задача взаимодействия поперечных (SV) волн цилиндрической полости в упругой

среде // Ўзбекистон Республикаси олий ҳарбий авиация билим юрти илмий ахборот журнали. – 2022. – Т. 1. – №2. – С. 68–74.

12. Кульмуратов Н.Р., Ишмаматов М.Р., Чориев М. Дифракция стационарных вязкоупругих волн на отверстиях цилиндрической формы // *Mexanika va matematikaning amaliy muammolari*. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – Toshkent: TKTI, 26–28 may 2022. – В. 94–98.

13. Намозов Ж.Ш., Чориев М. Радиальные колебания линейной вязкоупругой сферической оболочки // *Mexanika va matematikaning amaliy muammolari*. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – Toshkent: TKTI, 26–28 may 2022. – В. 199–202.

14. Кулдашов Н.У., Чориев М. Пространственная задача взаимодействия сейсмических волн с цилиндрической оболочкой в упругой среде // *Mexanika va matematikaning amaliy muammolari*. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – Toshkent: TKTI, 26–28 may 2022. – В. 317–320.

15. Кулдашов Н.У., Алмуратов Ш.Н., Чориев М. О собственных колебаниях прямолинейного участка газопровода при подводной прокладке // «Kimyo, neft-gazni qayta ishlash hamda oziq-ovqat sanoatlarini rivojlantirishda innovatsion texnologiyalar dolzarb muammolari». Respublika ilmiy-texnikaviy anjumani materiallari. – Toshkent, 25 noyabr 2022. – В. 157–159.

16. Мардонов Б.М., Нуриддинов Б.З., Сафаров У.И., Чориев М. Определение коэффициента жёсткости и демпфирования колебаний трубопровода, контактирующего с упруго-вязким слоем грунта // «Современные проблемы прикладной математики, информатики и механики». Материалы международной научной конференции. – Нальчик, 2023. – С. 194–196.

17. Кулдашов Н.У., Чориев М., Мирзакабилов Б.Н., Алмуратов Ш.Н., Ахмедов М.Ш. Нестационарные колебания сферических оболочек в вязкоупругой среде // «Рахматулин ўқишлари». Халқаро илмий-амалий конференция. – Тошкент, 26–27 май 2023. – В. 168–169.

18. Чориев М., Рахмонов Б.С., Каримов И.М., Уралов У.А. Стационарное деформирование цилиндрических оболочек с вязкоупругим наполнителем // *Mexanika va matematikaning amaliy muammolari*. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – Toshkent: TKTI, 17–18 may 2024.

19. Каримов И.М., Нуриддинов Б.З., Чориев М., Рўзимов А.Ш. О действии подвижной нагрузки на цилиндрическую оболочку с наполнителем // *Mexanika va matematikaning amaliy muammolari*. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – Toshkent: TKTI, 17–18 may 2024.

20. Сафаров У.И., Чориев М., Баракаев Д.У., Мустафоев Н.С. Портлаш юкланишларининг таъсирига балка назарияси асосида ҳимоя иншоотларини ҳисоблаш // *Mexanika va matematikaning amaliy muammolari*. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – Toshkent: TKTI, 17–18 may 2024.

21. Choriyev M. Suyuqlikli qovushoq-elastik qobiqda quvur to'liqining tarqalish xususiyatlari // «Umidli kimyogarlar – 2024» XXXIII ilmiy-texnikaviy anjumani materiallari. – Toshkent: TKTI, 24–26 aprel 2024. – В. 1116–1118.

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

Bosishga ruxsat etildi: 19.09.2025 yil. Bichimi 60x84 1/16 ,
«Times New Roman» garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 3. Adadi: 100 nusxa. Buyurtma № 263.
Guvohnoma AI №178. 08.12.2010.

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

