

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI  
INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH  
ASOSIDA BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

---

**TOSHKENT KIMYO-TEXNOLOGIYA INSTITUTI**

**KULDASHOV NASRIDDIN URINOVICH**

**QOVUSHOQ-ELASTIK SFERIK VA SILINDRIK FORMADAGI  
JISMLARDA TO‘LQIN TARQALISHI VA DIFRAKSIYASI  
MUAMMOSINING ILMIY ASOSLARI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI  
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

**Doktorlik (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**  
**Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации**  
**Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract**

**Kuldashov Nasriddin Urinovich**

Qovushoq-elastik sferik va silindrik formadagi jismlarda to‘lqin tarqalishi va difraksiyasi muammosining ilmiy asoslari .....3

**Кулдашов Насриддин Уринович**

Научные основы дифракции и распространения волн в вязкоупругих телах сферической и цилиндрической форм .....24

**Kuldashov Nasriddin Urinovich**

Scientific basis of diffraction and wave propagation in viscoelastic bodies of spherical and cylindrical shapes form .....47

**E’lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ

List of published works .....51

**MEXANIKA VA INSHOOTLAR SEYSMIK MUSTAHKAMLIGI  
INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH  
ASOSIDA BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

---

**TOSHKENT KIMYO-TEXNOLOGIYA INSTITUTI**

**KULDASHOV NASRIDDIN URINOVICH**

**QOVUSHOQ-ELASTIK SFERIK VA SILINDRIK FORMADAGI  
JISMLARDA TO‘LQIN TARQALISHI VA DIFRAKSIYASI  
MUAMMOSINING ILMIY ASOSLARI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI  
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

**Fizika-matematika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2021.1.DSc/FM171 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

---

Dissertatsiya Toshkent kimyo-texnologiya institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida ([www.insmech.uz](http://www.insmech.uz)) va "Ziyonet" Axborot ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy maslahatchi :** **Safarov Ismoil Ibrohimovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:** **Mardonov Botir Mardonovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor  
**Mirzayev Ibroxim Karimovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor  
**Yuldashev Sharofitdin Sayfitdinovich**  
Texnika fanlari doktori, professori

**Yetakchi tashkilot:** **O'zbekiston milliy universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 raqamli ilmiy kengash asosida bir martalik ilmiy kengashning 2024-yil «\_\_\_» \_\_\_ soat \_\_\_ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100047, Toshkent, Yahyo G'ulomov ko'chasi, 70-uy, Tel.: (+99871) 233-68-47; faks: (+99871) 233-77-82, e-mail: [konselyaria@ecademy.uz](mailto:konselyaria@ecademy.uz)).

Dissertatsiya bilan Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ \_\_\_ raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: (100047, Toshkent, Yahyo G'ulomov ko'chasi, 70-uy, Tel.: (+99871) 233-68-47; faks: (+99871) 233-77-82, e-mail: [konselyaria@ecademy.uz](mailto:konselyaria@ecademy.uz)).

Dissertatsiya avtoreferati 2024-yil «\_\_\_» \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.  
(2022-yil «\_\_\_\_\_» dagi \_\_\_\_\_ raqamli reyestr bayonnomasi).

**M.M. Mirsaidov**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
bir martalik ilmiy kengash kengash raisi, texnika  
fanlar doktori, professor, O'zRFA akademigi.

**M.K. Usarov**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
bir martalik ilmiy kengash ilmiy kotibi,  
Fizika-matematika fanlar doktori, professor.

**R.A. Abirov**  
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash  
qoslrtdagi Ilmiy seminar raisi, f-m.f.d., k.i.x

## KIRISH( fan doktori (DSc) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati.** Jahonda eng muhim muammolardan biri seysmik faol hududlarda barpo etilayotgan yer osti inshootlari qurilishining zilzilaga chidamliligini ta'minlashdir. Shuning uchun portlash va seysmik to'lqinlar ta'sirida yuzaga keladigan er osti inshootlarida kuchlanish va deformatsiyalarni, shuningdek to'lqinlarning difraksiyasini o'rganishga katta e'tibor berilmoqda. Shu munosabat bilan, zamonaviy yer osti inshootlarining ko'plab tarkibiy elementlariga dinamik yuklanishlar ta'sirida yuzaga keladigan rezonans hodisalarining oldini olish uchun, yangi avlod tuzilmalarini yaratishda, yuzaga keladigan kuchlanish va deformatsiyalar ruxsat etilgan chegaralardan oshmasligi uchun, ulardagi to'lqinlarning tarqalishi va difraksiyasi jarayonini bilish, konstruktiv echimlarini optimallashtirish alohida o'rin tutadi. Shu nuqtai nazardan, ko'plab xorijiy mamlakatlarda, shu jumladan AQSh, Germaniya, Rossiya, Xitoy va boshqa sanoati rivojlangan mamlakatlarda konstruksiyalarning mustahkamligi va raqobatbardoshligini oshirishga erishish uchun takomillashtirilgan matematik modellarni, samarali hisoblash usullarini, to'lqinlarga ta'sir qilish va tarqalishda energiyani maqsadli boshqarish muammosini ishlab chiqishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda bunday omillar, kompozitsion materiallarning reologik xususiyatlarining tarkibiy bir jinsli emasligi shuningdek ularning atrofdagi deformatsiyalanadigan muhit bilan o'zaro ta'siri orqali belgilanadigan muammolarni hal qilish usullari va dasturlarini ishlab chiqish bo'yicha maqsadli ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda, xususan, atrof-muhit bilan o'zaro ta'sir qiluvchi qobiq tuzilmalarining spektral xususiyatlarini maqsadli ilmiy o'rganish, shuningdek, strukturaviy elementlarning dissipativlik xususiyatlarini tahlil qilish bo'yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanadi.

Respublikamizda qurilishning rivojlanishi va qurilayotgan yer osti inshootlarining turli dinamik ta'sirlar ostida mustahkamligini ta'minlashga alohida e'tibor qaratilmoqda. Shuning uchun ushbu yo'nalishda ilmiy-tadqiqot ishlarini olib borish muhim ilmiy va 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 »<sup>1</sup> gi Farmoni, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-maydagi PQ-158-sonli "O'zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini

---

<sup>1</sup>O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 30-maydagi PF-144-son O'zbekiston Respublikasining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida

yanada takomillashtirishga oid qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida »<sup>2</sup> gi qarori, 2024 yil 17 apreldagi PQ-161-sonli “Bino va inshootlarning zilzilabardoshligini oshirish hamda seysmik xavfni monitoring qilish faoliyatini takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida »<sup>3</sup> gi qarori, hamda mazkur faoliyat sohalariga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilab ko‘rsatilgan vazifalarni amalga oshirishda ushbu tadqiqot ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Mazkur dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 30-maydagi “O‘zbekiston Respublikasining seysmik xavfsizlik tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi 144-sonli qarorlarida belgilangan vazifalarni bajarishga ma‘lum darajada xizmat qiladi. 2023-yil 16-maydagi PQ-158-son “O‘zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligi tizimini yanada takomillashtirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida” hamda 2020-yil 30-iyuldagi “O‘zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta‘minlash tizimini tubdan takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-4794-sonli qarori va shu bilan bog‘liq boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga xizmat qiladi.

**Tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasi Fan va texnologiyalarini rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga muvofiqligi.** Ushbu dissertatsiya tadqiqoti Respublika fan va texnikasini rivojlantirishning IV “Matematika, mexanika, inshootlarning seysmik dinamikasi va informatika” yo‘nalishi doirasida amalga oshirildi.

**Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy-tadqiqotlar sharhi.**

“Sferik va silindrsimon shakldagi qavushqoqelastik jismlarda difraksiya va to‘lqin tarqalishining ilmiy asoslari” muammosi bo‘yicha tadqiqot ishlari AQShning ko‘pgina ilmiy markazlari va oliy o‘quv yurtlarida (Ogayyo universiteti, Ogayyo shtati Nyu-York; Texas universiteti, Ostin, Texas), Hindiston (R. Gandi texnika universiteti, Bhopal; Texnologiya universiteti, Kanpur), Eron (Tehron, Tehron universiteti), Rossiya (N.G. Chernishevskiy nomidagi Saratov davlat universiteti; Tomsk politexnika universiteti, Sankt-Peterburg texnika universiteti; M .V.Lomonosov nomidagi Moskva davlat universiteti, Moskva davlat elektronika va matematika instituti, Rossiya Fanlar akademiyasining Sibir filiali); Armaniston (Armaniston Milliy fanlar akademiyasining Mexanika instituti), Angliya (Oksford universiteti), Ukraina (Ukraina Milliy fanlar akademiyasining suyuqliklar mexanikasi instituti; Milliy Fanlar akademiyasining S.P.Timoshenko nomidagi Mexanika instituti), Belorussiya (Belarus davlat universiteti, Minsk), Ozarbayjon (Ozarbayjon Milliy universiteti), Qozog‘iston (A. Yassaviy nomidagi Xalqaro Qozoq-Turk universiteti, Turkiston), Braziliya (Katolik universiteti, Rio-de-Janeyro). Bu mamlakatlarda parametrlardagi turli

---

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024 yil 17 apreldagi PQ-161-sonli “Bino va inshootlarning zilzilabardoshligini oshirish hamda seysmik xavfni monitoring qilish faoliyatini takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida

fizik va geometrik o'zgarishlarni hisobga olgan holda to'liqlarning turli shakldagi tuzilmalar bilan o'zaro ta'siri bo'yicha ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda.

Yuqoridagi tadqiqotlar asosan tekis to'liqlarining tarqalishi va diffraksiyasi muammolarini ko'rib chiqadi va eng oddiy hollarda ichki ishqalanishlar hisobga olinadi.

Nostatsionar va garmonik to'liqlarning suyuqlik oqayotgan qobiqqa ta'siri muammolari ham o'rganilgan. Shu bilan birga, ushbu ishlarda suyuqlik ideal deb qabul qilingan. So'nggi paytlarda yupqa qobiq yopishqoq suyuqlik bilan to'ldirilgan qalin silindrlar bilan almashtirilmoqda. Ushbu muammolar silindrsimon koordinatalarda siljish potentsiallari yordamida hal qilindi.

Dispersiya tenglamasi kirish parametrlari orqali maxsus funksiyalarida (silindrsimon Bessel va Hankel funksiyalari) murakkab ko'rinishda hosil qilinadi. Sonli yechimlarning asosiy tahlili matematik fizikaning maxsus funksiyalarining asimptotik (argumentning katta va kichik) qiymatlari uchun amalga oshiriladi. Tabiiy to'liqlarning qatlamli to'liq o'tkazgichlarda tarqalishi ham chiziqli matematik formulada dissipativ-bir jinsli va bir jinsi bo'lmagan soxalarda qaraladi va siljish potentsiallari (dekart yoki silindrsimon koordinatalarda) bo'yicha hal qilinadi.

Chop etilgan ishlarda fazoviy omillar va qavushqoqelastik xususiyatlarni hisobga olgan holda turli xil bir jinsli bo'lmagan to'liqlarning o'zaro ta'siri muammolarini o'rganishga kam e'tibor berilgan. Tekis deformatsiyalangan bir jinsli bo'lmagan muhitlarda maxsus differensial formulaorqali ba'zi sonli natijalar olingan. AQSh (Bronks universiteti, Nyu-York; Kaliforniya texnologiya instituti, Pasadena, Kaliforniya), Rossiya (Janubiy Ural universiteti, Chelyabinsk; Moskva elektron muhandislik instituti, matematika bo'limi olimlari tomonidan samolyot muammolari bo'yicha ba'zi nazariy va eksperimental olingan natijalar mavjud. M.V nomidagi Moskva davlat universiteti. Lomonosov, fizika fakulteti "Fizik-mexanik tizimlarni modellashtirish" kafedrasini, Moskva aviatsiya instituti), Ukraina (S.P. Timoshenko nomidagi mexanika instituti, FA, Kiyev), Xitoy (Gerbinsk texnologiya universiteti), Bolgariya (Bolgariya Fanlar akademiyasi mexanika va biomexanika instituti).

Materialning reologik xususiyatlarini hisobga olgan holda deformatsiyalanadigan jismlarda to'liq diffraksiyasi bo'yicha tadqiqotlar hali to'liq hal etilmagan. Bundan tashqari, hozirgi kunga qadar dissipativ-bir jinsli bo'lmagan mexanik tizimlarda to'liq diffraksiyasi masalalarini matematik shakllantirilmagan, ularni yechish usullari va algoritmlari matematik jihatdan ishlab chiqilmagan. Shuningdek, qavushqoqelastik jismlar uchun yadro va uning reologik parametrlarini tanlash masalalarini matematik shakllantirish va yechish, shuningdek, ularning mexanik tizimning kuchlanish-deformatsiya holatiga va demper tezligiga ta'siri hali to'liq ishlab chiqilmagan.

**Muammoni o'rganilganlik darajasi.** Jahon taniqli olimlar, xususan, ilyyushin a.a., Brekorov I.A., Grinchunov A.G., Grinchenko V.G., Gugolakin V.G., Kiiko I.A., Kiiko I.A., Kiiko I.A., Molotk Ov L.A., Novichkov Yu .I., Petrashen G.I., Krauklis P.V., Frolov K.V., Antonov A.N., Matviyenko V.P.,

Shardakov I.N., Starovoitov E.I., Devis R.M., Mitra R., Kolskiy G., Uayt, Achenbax J.D., Shafer B.V., Quyosh R.I., jumladan, o'zbek olimlari Raxmatulin X.A., O'razboyev M.T., Shirinqulov T.Sh., Kabulov V.K., Rashidov T.R., Muborakov Y.N., Mardonov B.M., Sultonov K. .S., Mamatqulov Sh.M., Mirsaidov M.M., F.M., Mirsaidov, F.B., Ba.B. Xojmetov G.X., Ishanxo'jayev A.A., Mavlonov T.M., Abdusatorov A., Safarov I.I., Qudainazarov X., Xasanov B.E., Teshayev M.X., Usarov M.K., B.Sh. Usmonov, Yo'ldoshev Sh.S. va boshqalar materialning dissipativ xususiyatlarini hisobga olgan holda, turli ta'sirlar ostida plastinka va qobiq mexanik tizimlarining tebranishlarini ilmiy tahlil qilishdi.

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 diffratsiyasining yangi qonuniyatlarini ochishga imkon beradi. Ishonchli usullar va algoritmlarni yaratish dinamik mustahkamlik va barqarorlikning ko'plab muammolarini, xususan, mashinasozlik va yer osti inshootlarini qurilishida hal qilinishi mumkin.

### **Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining**

**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.** Chegarasiz deformatsiyalanuvchi muhit bilan bog'langan silindrsimon va sferik jismlarga nisbatan qavushqoqelastik (tuzilish jihatdan bir jinsli va bir jinsli bo'lmagan) mexanik tizimlarning dinamikasi nuqtai nazaridan nazariy asoslar va yechim usullarini ishlab chiqish.

#### **Tadqiqotning vazifalari:**

- sirt (yoki hajmiy) to'lqinlari ta'siri ostida deformatsiyalanuvchi muhit bilan qavushqoq-elastik silindrsimon (sferik) jismlarning dinamik harakatlarini, kuchlanish-deformatsiya holatini baholashning nazariy asoslarini va umumlashtirilgan matematik modelini ishlab chiqish;

- energiyaning tarqalishini hisobga olgan holda qovushqoq- elastik silindrsimon (sferik) qobiqlarning erkin va majburiy tebranishlarini o'rganish bo'yicha masalalarni yechishning matematik modili, metodikasi va algoritmini ishlab chiqish;

- silindrsimon (sferik) jismlarning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini, ularning strukturaviy bir jinsli va bir jinsli bo'lmaganlik holatiga to'lqinlar ta'sirini qiyosiy baholash;

- yer ostidagi silindrsimon qobiqning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatiga Reley sirt to'lqinlari parametrlarining ta'sirini baholash;

- cheksiz deformatsiyalanuvchi muhit bilan o'zaro ta'sir qiluvchi qavushqoq-elastik silindrsimon qobiqda "quvur va suv" to'lqinlarining paydo bo'lish baholash;

- elastik (yoki qavushqoq-elastik) muhit bilan o'zaro ta'sir qiluvchi silindrsimon yoki sferik jismlarning tabiiy tebranishlari paytida Zommerfeld qisqartirilgan shartlarini asoslash;

- qobiq qalinliginingf oshirish bilan xos chastotalar qiymatlari haqiqiy va mavhum qismlarining ta'sirini baholash.

**Tadqiqot ob'yekti** - qavushqoqelastik muhitdagi ko'p qatlamli silindrsimon va sferik jismlar.

**Tadqiqot predmeti** Cheksiz deformatsiyalanuvchi muhit bilan bog'langan silindrsimon(sferik) jismlarga qavushqoqelastik (bir jinsli va bir jinsli bo'lmagan) mexanik tizimlar dinamikasi masalalarini yechishning matematik modellari va usullarini ishlab chiqish tadqiqoti predmeti.

**Tadqiqot usullari.** Tadqiqotda matematik fizika usullari, integral shakl o'zgartirish usullari (Fure va Laplas), muzlatish usuli, Myuller usuli, Gauss usuli, Godunovning ortogonal supurish usuli qo'llanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagicha:**

- sirt (yoki hajmiy) to'lqin ta'sirida deformatsiyalanuvchi muhit bilan o'zaro ta'sir qiluvchi qavushqoq-elastik silindrsimon (sferik) jismlarning dinamik harakati, kuchlanish-deformatsiya holatini baholashning nazariy asoslari ishlab chiqilgan va matematik modellari umumlashtirilgan;

- energiyaning dissipatsiyasini hisobga olgan holda qavushqoq-elastik silindrsimon (sferik) qobiqlarning erkin va majburiy tebranishlarini o'rganish uchun matematik modellashtirish, muammolarni hal qilish sonli usullari va algoritmi ishlab chiqilgan;

- silindrsimon (sferik) jismlarning kuchlanish-deformatsiya holatini, ularning strukturaviy bir jinsli va bir jinsli bo'lmaganlik holatiga to'lqinlar ta'siri qiyosiy aniqlandi;

- yer ostidagi silindrsimon qobiqning kuchlanish-deformatsiya holatiga Reley sirt to'lqinlari parametrlarining ta'siri topildi. Natijada ko'ndalang to'lqinlar ta'siridagi kontur kuchlanishlari bo'ylama to'lqinlar ta'siridagi kontur kuchlanishlaridan 15-20% ko'proq ekanligi aniqlandi;

- cheksiz deformatsiyalanuvchi muhit bilan o'zaro ta'sir qiluvchi qavushqoq-elastik silindrsimon qobiqda "quvur va suv" to'lqinlarining paydo bo'lishi topildi.

- Qobiq qalinliginingf oshirish bilan xos chastotalar qiymatlari haqiqiy va mavhum qismlarining oshishi aniqlandi. Natijada birinchi chastota qiymatining 20% ga, ikkinchi chastotaning 5-10% ga oshishi va uchinchi chastotaning qiymati deyarli o'zgarmasligi aniqlandi.

**Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:**

- olingan yangi effektlar (har xil parametrlarga ko'ra susaytirish koeffitsentining monoton bo'lmagan bog'liqligi yoki tezligi haqida) mashinasozlik va qurilishning turli sohalarida amaliy masalalarni hal qilishda, shuningdek, yangi texnika va texnologiyani joriy etishda foydalanish mumkin;

- ishlab chiqilgan usullar va suyuqlik bilan silindrsimon jismlar uchun olingan natijalar turli sohalarda amaliy masalalarni hal qilishda muvaffaqiyatli qo'llaniladi;

- ishlab chiqilgan usullar va olingan natijalar er osti inshootlarining SSSni kamaytirishga yordam berish, shuningdek, mexanik tizimning dissipativ xususiyatlarini optimallashtirish uchun mo'ljallangan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Chegaraviy masalalarni to'g'ri shakllantirish, olingan matematik ifodalarning qat'iyligi, asosli echish usullarini qo'llash, echimlarning to'g'riligini baholash va boshqa olimlar tomonidan olingan echimlar bilan taqqoslash bilan oqlanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.**

Olingan natijalarning nazariy ahamiyati shundaki, ular dissipativ (dissipativ-bir jinsli va bir jinsli) kengaytirilgan mexanik tizimlarning dinamik nazariyasini rivojlantirishga muhim hissa qo'shadi.

**Natijalarning amaliy ahamiyati shundaki,** butun mexanik tizimning damping xususiyatlarini hisoblash (dinamik kuchlanish-deformatsiya holati) va optimallashtirish uchun metodologiya va algoritmi ishlab chiqishda yotadi. Qatlamli dissipativ jismlarning tebranishlarini eng katta yutish qobiliyatini ta'minlaydigan mexanik tizimning parametrlari aniqlanadi. Tananing topilgan tabiiy chastotalari (silindrsimon va sharsimon shakllar) yangi turdagi tuzilmalarni yaratish uchun keng istiqbollarni ochadi.

**Tadqiqot natijalarini joriy etish.** "Sferik va silindrsimon shakldagi viskoyelastik jismlarda difraksiya va to'lqin tarqalishining ilmiy asoslari" mavzusida ishlab chiqilgan usullar va hisoblash algoritmlari qo'llanildi:

F-4-14 loyihasini amalga oshirish jarayonida "Dinamik yuklar ta'sirida oqayotgan suyuqlik bilan yupqa devorli er osti quvurlarining egri uchastkalarining dinamik kuchlanish-deformatsiya holatini o'rganish usullarini ishlab chiqish va nazariyani ishlab chiqish" 2012 yilda yakunlandi. -2016 yil. Buxoro muhandislik-texnologiya institutida (Sertifikat 04/05-87/966 2023 yil, 14 iyun).

Ishlab chiqilgan usullardan murakkab chastotalar va o'ziga xos rejimlarni aniqlash OT-F4-01 fundamental loyihasida qo'llanilgan "Oqim ostida oqadigan yopishqoq suyuqlik bilan kompozit ko'p qatlamli kompozit quvurlarning chiziqli bo'lmagan dinamik kuchlanish-deformatsiya holatini o'rganish usullarini ishlab chiqish va nazariyani ishlab chiqish". harorat va dinamik yuklarning ta'siri", 2016-2020 yillarda Toshkent kimyo-texnologiya institutida Davlat ilmiy-texnika dasturi doirasida amalga oshirilgan (2023 yil 16 iyundagi 1/01-2041-sonli guvoohnoma). Natijada, yuk ostida ishlaydigan dissipativ bir hil yoki bir hil bo'lmagan tizimlarda kuchlanish-deformatsiya holatini dastlabki baholash mumkin bo'ldi.

Surxondara viloyati avtomobil yo'llari qurilishi bosh boshqarmasida N.U. Qo'ldoshovanning "Sferik va silindrsimon shakldagi viskoyelastik jismlarda difraksiya va to'lqin tarqalishining ilmiy asoslari" mavzusida silindrsimon qobiqlar uchun silindrsimon qatlam to'ldirgichlar masalasini yechishda qo'llangan (Ma'lumotnoma No 10/3-429 2023 yil 2 avgust). Natijada seysmik to'lqinlarning o'zaro ta'sirida er osti silindrsimon inshootlarning seysmik holatini dastlabki baholash imkoniyati paydo bo'ldi.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiya qilish.

Dissertatsiya natijalari 10 ta Xalqaro konferensiyalarda sinovdan o'tkazildi.

Dissertatsiya ishining to'liq mazmuni haqida ma'lumot berildi va muhokama qilindi:

- Toshkent kimyo-texnologiya institutida universitetlararo ilmiy seminar (2023 yil 14 oktyabrdagi 8-son bayonnoma);

- "Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" Milliy tadqiqot universiteti "Mexanika va kompyuter modellashtirish" kafedrasida "Mexanika muammolari" Respublika ilmiy seminari (2024-yil 27-apreldagi 20-son bayonnoma).

**Tadqiqot natijalarining aprotatsiyasi.** Tadqiqot natijalari 17 ta xalqaro va 11 ta respublika konferentsiyalarida e'lon qilindi.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 28 ta ilmiy ishlar chop etilgan bo'lib, shundan 18 tasi ilmiy maqolalar, jumladan, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan asosiy ilmiy natijalarni chop etish uchun tavsiya etilgan respublika va 13 ta xorijiy jurnallarda 5 tasi.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, besh bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 189 bet bo'lib, 52 ta rasm, 6 ta jadval va 150 nomdagi adabiyotlar ro'yxatidan iborat.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya tadqiqotining dolzarbligi va zaruriyati asoslab berilgan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, ob'ekti va predmeti 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 ishonchligi asoslangan, ularning ilmiy va amaliy ahamiyatlari yoritilgan. Tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etilishi, ishning aprotatsiyasi, chop etilgan ishlar, dissertatsiya tuzilishi va hajmi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Qovushoq-elastik sferik va silindrik jismlarda to'lqin difraksiyasi va tarqalishiga doir adabiyotlar tahlili**» deb nomlangan birinchi bobida, elastik va qovushoq-elastik sferik va silindrsimon jismlarda to'lqin tarqalishi va difraksiyasi masalalarini o'rganishga bag'ishlangan adabiyolarning qisqacha tahlili keltirilgan. Adabiyotlar tahlili asosida quyidagicha xulosalar qilingan: qovushoq-elastik sferik va silindrik jismlarda to'lqin tarqalishini va difraksiyasini o'rganishni ifodalovchi xususiy xosilali integro-differensial tenglamalar materiallarning dissipativlik xususyatlarini hisobga olib umimiy holda topilmagan, uni yechish metodikasi va algoritmi ishlab chiqilmagan; qovushoq-elastik ko'p qatlamli silindrik (yoki sferik) qobiqda xos to'lqin tarqalishini ifodalovchi dispersion tenglama operator ko'rinishida berilgan Lamé tenglamasi asosida umimiy holda topilmagan, yechish metodikasi va algoritmi ishlab chiqilmagan; to'lqin tarqalishini ifodalovchi chegaraviy masala va undan kelib chiquvchi spektral masala qo'yilmagan, yechish metodikasi va algoritmi ishlab

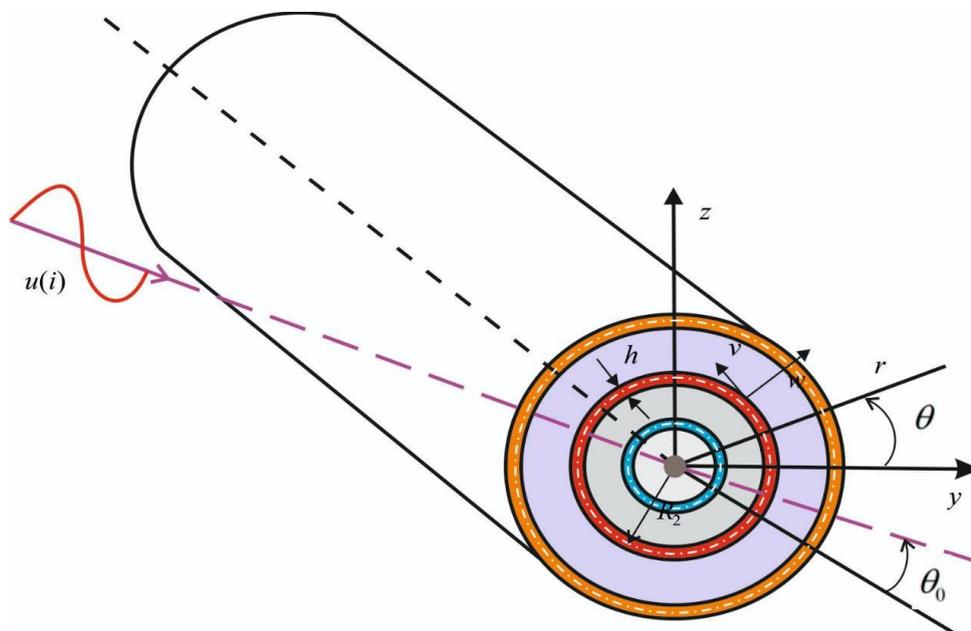
chiqilmagan; quvur to‘lqinlar va uning dissipatsiyasi bo‘yicha yetarlicha tadqiqotlar qilinmagan.

Shunday qilib, qovushoq, deformatsiyalanuvchi sferik va silindrik jismlarda to‘lqin tarqalish va difraksiyasini o‘rganishga ko‘p sonli ilmiy ishlar bagishlangan bo‘lsada, adabiyotlar tahlilining yakuni bo‘yicha qilingan xulosalardan kelib chiqib, bu muammo o‘zining yakuniy yechimidan uzoq ekanligi kelib chiqadi. Bu muammoni hal etishda nazariy asos yaratish, chegaraviy masalaning qo‘yilishi, yechish metodikasini, algoritmini va dasturini ishlab chiqish dolzarb muammo ekanligi ko‘rsatib berilgan.

«Qovushoq-elastik sferik va silindrik jismlarga to‘lqin difraksiyasi va tarqalishi masalasini qo‘yilishi, yechish metodikasi va algoritimi» deb nomlangan ikkinchi bobida masalalarning matematik qo‘yilishi, yechish metodikasi va algoritimi keltirilgan. Tog‘ri chiziqli ko‘p qatlamli va egri chiziqli kompozit silindrsimon (yoki sferasimon) qobiqlarning chiziqli bo‘lmagan harakat differensial tenglamalari, boshlang‘ich va chegaraviy shartlari, qo‘llaniladigan tamoyillar va usullar keltirilgan. Oqayotgan yopishqoq suyuqlik bilan katta diametrli ko‘p qatlamli kompozit silindrsimon quvurlarning egri (va to‘g‘ri) chiziqli uchastkalari uchun chiziqli bo‘lmagan harakat differensial tenglamalari chiqarilgan, hisob sxemasi keltirilgan (1-rasm).

Qalinligi  $h$  bo‘lgan ko‘p qatlamli qovushoq-elastik silindrik (yoki sferik) jismga to‘lqin yuklanishi masalasini ko‘ramiz. Dekart koordinatalar sistemasida  $(Oxyz)$  qatlam quyidagi sohani egallaydi:

$$x \in (-\infty, +\infty), \quad y \in (-\infty, +\infty), \quad z \in [-h, h] \quad (1\text{-rasm}).$$



**1-rasm. Ko‘p qatlamli silindrik qobiqning hisob sxemasi**

Silindrik jismda to‘lqin tarqalishi masalasi qovushoq-elastiklik nazaryasining Lamé xususiy hosilali integro-differensial tenglamalari sistemasidan foydalanib o‘rganiladi:

$$\tilde{\mu}_\kappa \nabla^2 \bar{u} + (\tilde{\lambda}_\kappa + \tilde{\mu}_\kappa) \text{graddiv } \bar{u} = \rho_\kappa \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2}, \quad (\kappa=1,2) \quad (1)$$

$$\tilde{\lambda}_\kappa f(t) = \lambda_{0\kappa} \left[ f(t) - \int_0^t R_{\lambda\kappa}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \quad \tilde{\mu}_\kappa f(t) = \mu_{0\kappa} \left[ f(t) - \int_0^t R_{\mu\kappa}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right].$$

Bu yerda  $f(t)$ –vaqtning ixtiyoriy funksiyasi,  $R_{\lambda\kappa}(t-\tau)$  va  $R_{\mu\kappa}(t-\tau)$ –relaksatsiya yadrolari,  $\lambda_{0\kappa}$ ,  $\mu_{0\kappa}$ –oniy elastiklik modullari,  $\vec{u}(u_n, u_{s1}, u_{s2})$ –ko‘chish vektori.

Silindrik jisimning ichki sirtida kuchlanishlardan ozodlik sharti qo‘yiladi:

$$r = R_{\kappa+1}; \quad \sigma_{rr(\kappa+1)} = 0; \quad \sigma_{r\theta(\kappa+1)} = 0; \quad \sigma_{rz(\kappa+1)} = 0. \quad (2)$$

Qovushqoq-elastik silindrik jism defomatsiyalanuvchi qatlamlardan tashkil topgan bo‘lsin. Muhit chegarasida silindrik sirt qattiq mahkamlangan bo‘lsa, u holda kuchlanish tenzorining va ko‘chish vektorining mos komponentalari teng bo‘ladi:

$$\begin{aligned} r = R_\kappa; \quad \sigma_{rr\kappa} = \sigma_{rr(\kappa+1)}; \quad \sigma_{r\theta\kappa} = \sigma_{r\theta z(\kappa+1)}; \quad \sigma_{rz\kappa} = \sigma_{rz(\kappa+1)}; \\ u_\kappa = u_{\kappa+1}; \quad \mathcal{G}_\kappa = \mathcal{G}_{\kappa+1}; \quad w_\kappa = w_{\kappa+1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Agar qatlamlar orasida sirpanuvchanlik sharti qo‘yilgan (qatlamlar orasida qarshilik bo‘lmasa) bo‘lsa

$$\begin{aligned} r = a_\kappa: \quad \sigma_{rr\kappa} = \sigma_{rr(\kappa+1)}; \quad \sigma_{r\theta\kappa} = \sigma_{rz\kappa} = 0; \\ \sigma_{r\theta(\kappa+1)} = \sigma_{rz(\kappa+1)} = 0; \quad w_\kappa = w_{\kappa+1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Cheksizlikda Zommerfeldning yutilish sharti qo‘yiladi:

$$\begin{aligned} \lim_{r \rightarrow \infty} \varphi_1 = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} (\sqrt{r}) \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} + i\alpha_1 \varphi_1 \right) = 0, \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \psi_1 = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} (\sqrt{r}) \left( \frac{\partial \psi_1}{\partial r} + i\beta_1 \psi_1 \right) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

To‘ldiruvchili qobiqqa tushuvchi to‘lqinlarning tartarqalishi masalasini ko‘ramiz. Muhitda tarqalayotgan silindrik to‘lqinlar, tekis deformatsiya holati uchun, quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi:

$$\varphi_N^{(p)} = \varphi_0 i\pi \sum_{n=1}^{\infty} [(-1)^n E_n J_n(\alpha_N r) H_n^{(1)}(\alpha_N z)] \cos n\theta e^{-i\omega t}, \quad (6)$$

bunda  $E_n = \{1, n=0; 2, n \geq 1\}$ ,  $J_n$  - Besselning silindrik funksiyasi:

$$S_{2n} = 2\mu_r \left( i\alpha - \frac{1}{r} \right) E_{n1} n J_n(\gamma r); \quad S_{3n} = 2\mu_r (i\alpha) n E_{n1} J_n(\gamma r).$$

Asosiy maqsad garmonik (uzun seysimik to‘lqin) va noto‘rg‘un to‘lqin ta’sir etganda ko‘p qatlamli silindrik jism va muhitdagi kuchlanish – deformatsiya holatini aniqlash metodikasi va algoritimini yaratishdan iborat.

Agar tushadigan to‘lqin kuchsiz zarbali bo‘ylama to‘lqini bo‘lsa u holda to‘lqin potentsiali quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi

$$\phi_0(L, t) = \phi_0(R, \theta, Z, t) = \phi_* L^{-1} f(t - L/c_L) [H(t - L/c_L) - H(t - L/c_L - t_*)]$$

$$L = (Z^2 + R^2 + R_*^2 - 2RR_* \cos \theta)^{1/2}, \quad (7)$$

bunda  $L$  - to'liqin manbasidan jismgacha bo'lgan masofa;  $R, \theta, Z$  - silindrik koordinatalar sistemasidagi o'zgaruvchilar,  $t$ -vaqt;  $t^*$  - ta'sir etish davri;  $c_L$  - materialda bo'ylama to'liqin tarqalish tezligi;  $\phi_*$  - normalashtiruvchi kattalik;  $H(t)$ -Xevsayd funksiyasi.

Agar xos to'liqinlar tarqalish masalasi ko'rilsa, u xolda (1) tenglamani yechish uchun (2)-(4) chegraviy shartlar asosida ulardagi integral hadlarni kichik deb faraz qilsak hamda Filatov A., Sunchaliyev R.M. tomonidan ishlab chiqilgan muzlatish (zamorajivaniya) usulini qo'llash orqali masala yechiladi.

Quyilgan masalani yechish metodikasini keltiramiz. Qo'yilgan masala ko'chish potentsiallarida ifodalanib, kompleks parametrli dispersion munosabat analitik olinadi va sonli yechiladi. Olingan (5) tenglamani ko'chish vektorining potentsialli va solenoidli yig'indisi ko'rinishda tasvirlasak, u holda qatlamlarning ko'chishi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\vec{u}_k = \text{grad} \varphi_k + \text{rot} \vec{\psi}_k, \quad \text{div} \vec{\psi}_k = 0. \quad (8)$$

Bu yerda  $\varphi_k$  - bo'ylama to'liqin potentsiali va  $\vec{\psi}_k(\psi_{rk}, \psi_{\theta k}, \psi_{zk})$  - ko'ndalang to'liqin potentsiali bo'lib quyidagi differensial tenglamalar sistemasini qanoatlantiradi:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi_k - \frac{1}{\bar{c}_{pK}^2} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \psi_{zk} - \frac{1}{\bar{c}_{sK}^2} \frac{\partial^2 \psi_{zk}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \psi_{\theta k} - \frac{\psi_{\theta k}}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{rk}}{\partial \theta} - \frac{1}{\bar{c}_{sK}^2} \frac{\partial^2 \psi_{\theta k}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \psi_{rk} - \frac{\psi_{rk}}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{\theta k}}{\partial \theta} - \frac{1}{\bar{c}_{sK}^2} \frac{\partial^2 \psi_{rk}}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Bu yerda  $\bar{c}_{sK}^2 = c_{sK}^2 \Gamma_K^*$ ,  $\bar{c}_{pK}^2 = c_{pK}^2 \Gamma_K^*$ . U holda (9) differensial tenglamalarning yechimini quyidagi ko'rinishda izlaymiz:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \phi_n(\alpha_k r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}, \\ \psi_{rk}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{nr}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ -\cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}, \\ \psi_{\theta k}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{n\theta}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}, \\ \psi_{zk}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{nz}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ \cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Bu yerda  $n$  - butun son,  $\gamma_{pk}$  - to'liqin tarqalshining doimiy soni,  $\omega$  - kompleks xususiy chastota,  $r = \frac{r_1}{a_0}$ ,  $z = \frac{z_1}{a_0}$ . (10) ni (9) ga qo'yib, quyidagi oddiy differensial tenglamalar sistemasini olamiz:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \phi_k}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\phi_k}{dr} + \left( \alpha_k^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \phi_k &= 0, \\ \frac{d^2 \psi_{zk}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{zk}}{dr} + \left( \beta_k^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \psi_{zk} &= 0, \\ \frac{d^2 \psi_{\theta k}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{\theta k}}{dr} + \frac{1}{r^2} \left( -n^2 \psi_{\theta k} + 2n \psi_{\theta k} - \psi_{\theta k} \right) \beta^2 \psi_{\theta k} &= 0, \\ \frac{d^2 \psi_{rk}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{rk}}{dr} + \frac{1}{r^2} \left( -n^2 \psi_{rk} + 2n \psi_{\theta k} - \psi_{rk} \right) \beta^2 \psi_{rk} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Bu yerda  $\alpha_k^2 = \frac{\overline{\Omega}_k^2}{\gamma_k^2} - \gamma_p^2$ ,  $\beta_k^2 = \overline{\Omega}_k^2 - \gamma_p^2$ ,  $\overline{\Omega}_k = \frac{\omega \alpha_k}{c_{sk}}$ ,  $\gamma_k^2 = \frac{2(1 - \nu_k)}{1 - 2\nu_k}$ .

(11) tenglamalardagi birinchi ikkita tenglamalarning yechimlari birinchi ( $k=1$ ) va tashqi silindr ( $k=N$ ) uchun quyidagi ko'rinishda izlanadi:

$$\phi_k(r) = F_{nk} J_n(\alpha_k r) + F'_{nk} N_n(\alpha_k r), \quad \psi_{zk}(r) = M_{1k} H_n^{(1)}(\beta_k r) + M'_{1k} H_n^{(2)}(\beta_k r),$$

bu yerda  $J_n(\alpha_k r)$ -  $n$  - tartibli Bessel funksiyasi,  $H_n^{(1,2)}(\beta_k r)$ - $n$ - tartibli birinchi va ikkinchi tipdagi Xankel funksiyasi. (9) ning oxirgi ikkita tenglamasini yechish uchun ixtiyoriy o'zgarmaslardan bittasini ixtiyoriy usulda tanlash imkoniyatidan foydalanib, keyin quyidagilarni qabul qilamiz:  $L_{1k} = L'_{1k} = 0$ , va  $\psi_{rk} = -\psi_{\theta k}$ .

Shunday qilib, qovushoq-elastik cheksiz uzun silindrik qobiqda garmonik to'liqin tarqalishini ifodalovchi spektral chegaraviy masala shakllantirildi. Masala kompleks arifmetikada maxsus funksiyalarni hisoblash usullari, muzlatish usuli, Gauss, Laplass va Myuller metodlarini birgalikda qo'llash orqali yaratilgan metodika asosida yechiladi.

Ixtiyoriy o'zgarmaslarni topish uchun chegaraviy shartlar (2) - (5) dan foydalansak, bir jinsli bo'lmagan kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalar sistemasini olamiz

$$[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)] \{q\} = \{P_1\},$$

bunda  $\{q\}$ - ixtiyoriy o'zgarmaslardan tashkil topgan ustun vektor,  $\{R\}$ - tashki ta'sir ustun vektori;  $[C_1]$  - kvadrat matritsa, elementlari Bessel va Xankel funksiyalaridan tashkil topgan.

Uzun silindrik qovushoq-elastik qobiqlarga xos to'liqlar tarqalishi masalasini yechish dispersion tenglamasi quyidagi ko'rinishga bo'ladi

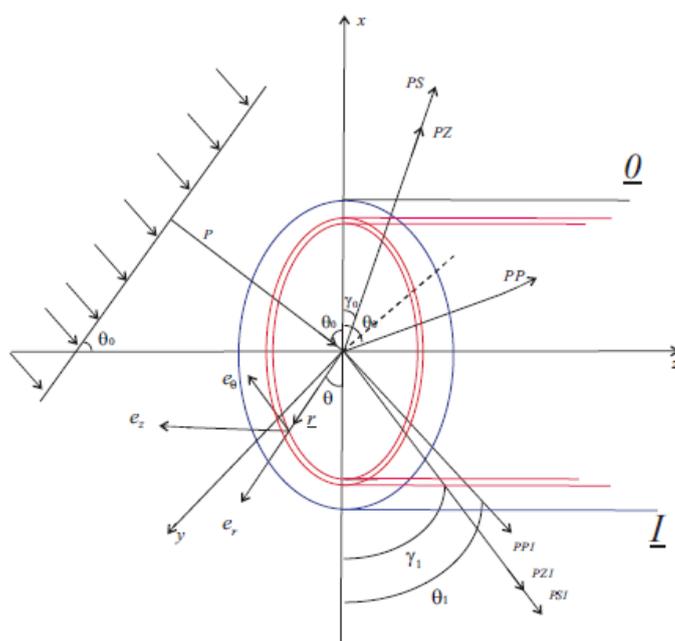
$$\det[R(k, \omega)] = 0. \quad (12)$$

(12) tenglamaning ildizi kompleks ( $k_j = k_j(\omega) = \text{Re} k_j(\omega) + i \text{Im} k_j(\omega)$ ,  $j = 1 \dots n$ ) bo'ladi. Masala kompleks arifmetikada Myuller, Laplas, Gauss usullari, Fur'e almashtirishi hamda maxsus funksiyalarga asoslangan metodika va algoritm bilan yechiladi. Qo'llangan

algoritm asosida  $C^{++}$  tilida dastur ishlab chiqilgan. Test masalalarni yechishda MAPLE-18 va MATLAB dasturiy ta'minotidan ham foydalanildi.

Shunday qilib ikkinchi bobda to'liq yuklanishi (va difraksiyasi) masalalarini yechishda ko'chishlar orqali ifodalangan Lamé tenglamasidan foydalanib, ko'chish potentsiallari orqali ifodalangan xususiy hosilali integro-differensial tenglamalar sistemasi olindi va analitik yechimni muzlatish, Gauss, Furening integral almashtirishi, Laplas va maxsus funksiyalar usullari asosida yaratilgan metodika va algoritmi asosida yechiladi.

Dissertatsiyaning «**Strukturaviy bir jinsli bo'lmagan ko'p qatlamli silindrik jismning dinamik kuchlanishlar va deformatsiya holati**» deb nomlangan uchinchi bobida qovushoq-elastik silindrik qobiqda garmonik va noto'rg'un to'liq yuklanishi masalasining yechimi va sonli natijalar tahlili keltirilgan (2-rasm).



**2-rasm. Silindrik qobiqda to'liq yuklanishining hisob sxemasi**

Hisoblashlar ikkinchi bobda keltirilgan Gauss va maxsus funksiyalarni hisoblash usullari asosida yaratilgan algoritm va dastur yordamida amalga oshirildi. Silindrning ixtiyoriy  $k$ -chi qatlamining ko'chishi Bessel va Neymanning  $n$ -chi tartibli kompleks argumentli funksiyalari yordamida ifoda qilinadi:

$$u_{rk} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \gamma_{\kappa} \left[ A_{1kn} J'_n(\gamma_{1\kappa} r) + A_{2kn} Y'_n(\gamma_{1\kappa} r) \right] + \frac{n}{r} \left[ A_{3kn} J_n(\gamma_{2\kappa} r) + A_{4kn} Y_n(\gamma_{2\kappa} r) \right] - \frac{r\gamma_{2\kappa}}{\mu_{2\kappa}} \left[ A_{5kn} J'_n(\gamma_{2\kappa} r) + A_{6kn} Y'_n(\gamma_{2\kappa} r) \right] \right\} e^{i\left(\frac{\omega \cos \theta_k}{C_{Pk}} z - \omega t\right)} ; \quad (15)$$

$$u_{\phi\kappa} = -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{n}{r} \left\{ \gamma_{\kappa} \left[ A_{1kn} J_n(\gamma_{1\kappa} r) + A_{2kn} Y_n(\gamma_{1\kappa} r) \right] + \frac{r\gamma_{2\kappa}}{n} \left[ A_{3kn} J'_n(\gamma_{2\kappa} r) + A_{4kn} Y'_n(\gamma_{2\kappa} r) \right] - \frac{r}{\mu_{2k}} \left[ A_{5kn} J_n(\gamma_{2\kappa} r) + A_{6kn} Y_k(\gamma_{2\kappa} r) \right] \right\} e^{i\left(\frac{\omega \cos \theta_k}{C_{Pk}} z - \omega t\right)};$$

$$u_{zk} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \gamma_k \left[ A_{1kn} J_n(\gamma_{1k} r) + A_{2kn} Y_n(\gamma_{1k} r) \right] + \frac{\gamma_{2k}^2}{n} \left[ A_{5kn} J_n(\gamma_{2k} r) + A_{6kn} Y_n(\gamma_{2k} r) \right] \right\} e^{i\left(\frac{\omega \cos \theta_k}{C_{Pk}} z - \omega t\right)},$$

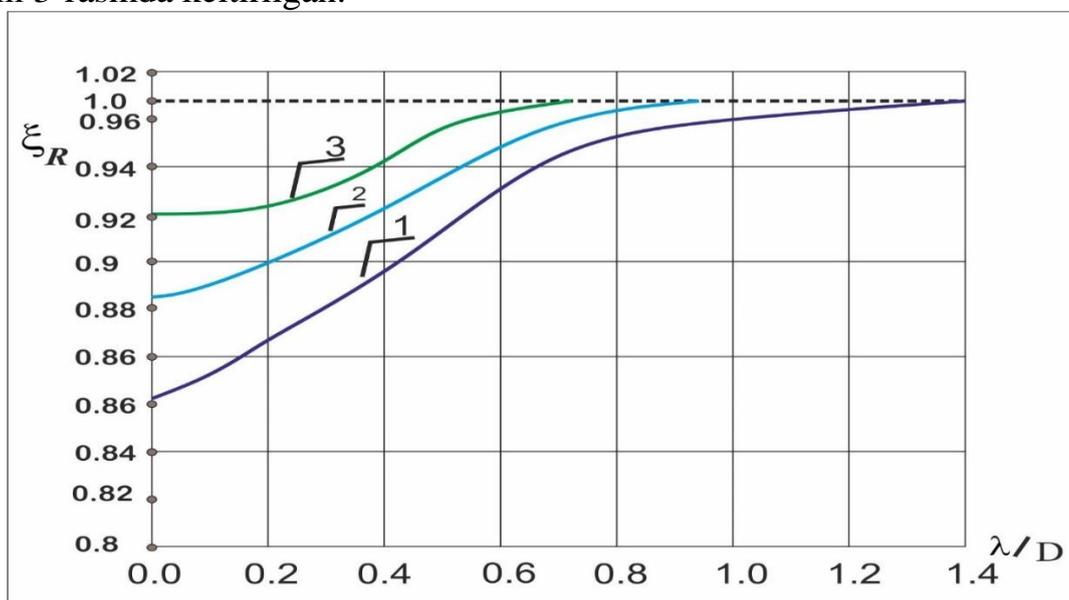
Bunda

$$\gamma_{1k}^2 = \bar{\mu}_{1k}^2 - \gamma^2; \quad \bar{\mu}_{1k} = \frac{\omega}{a_{1k} \Gamma_k}; \quad \gamma_{2k}^2 = \bar{\mu}_{2k}^2 - \gamma^2;$$

$$\bar{\mu}_{2k} = \omega / c_{sk} \Gamma_{2k}; \quad c_{sk}^2 = \frac{\bar{\mu}_k}{\rho_k}; \quad \gamma = m\pi / l, \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (k = 1, 2, 3).$$

Ixtiyoriy o'zgarmlar  $A_{1kn}, A_{2kn}, A_{3kn}, A_{4kn}, A_{5kn}, A_{6kn}$  ni topish uchun (2) - (5) chegaraviy shartlardan foydalanamiz. U holda  $6\kappa + 3$  ta tenglama va  $6\kappa + 3$  ta noma'lumlarni olamiz. Bir jinsli bo'lmagan tenglamalar sistemasi Gauss usuli bilan yechiladi.

Birinchi chastotaga mos kelgan faza teziligini to'liq uzunligiga bog'liq o'zgarishi 3-rasmda keltirilgan.



**3-rasm. Birinchi chastotaga mos kelgan faza teziligini to'liq uzunligiga bog'liq o'zgarishi**

$$4(1 - \xi_1^2) \left[ \frac{1}{\beta a} + \Psi_{H01}(\bar{\beta} a) \right] - 2(1 - \xi_1^2)(1 - \xi_2^2)^{1/2} \left[ \frac{1}{\bar{\alpha} a} + \Psi_{H01}(\bar{\alpha} a) \right] + b \frac{\xi_1^2(2 - \xi_1^2)}{(1 - \xi_2^2)^{1/2}} \Psi_{H01}(\bar{\alpha} a) = 0.$$

Bunda

$$\Psi_{H_{01}}(\alpha) = H_0^{(1)}(\alpha) / H_1^{(1)}(\alpha) = -iK_0(|\alpha|) / K_1(|\alpha|) = -i\Psi_K(|\alpha|),$$

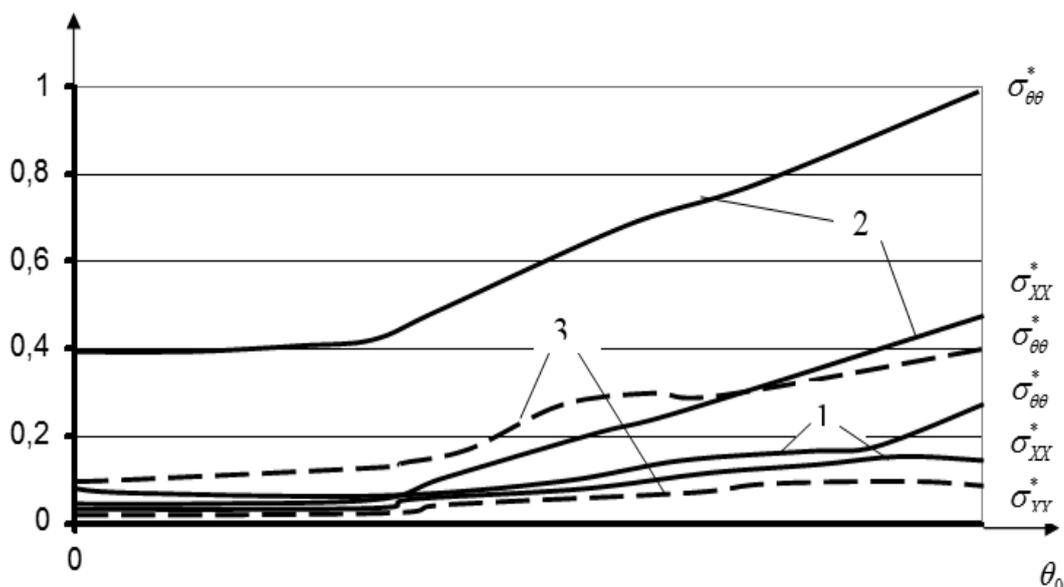
$$\Psi_K(y) = K_0(y) / K_1(y).$$

Qovushoq-elastik material relaksatsiya yadrosi sifatida uch parametrlilikka ega bo'lgan Rjanitsin-Koltunov yadrosini olamiz:  $R_{\lambda, \mu, \nu}(t) = A_{\lambda, \mu, \nu} e^{-\beta_{\lambda, \mu, \nu} t} / t^{1-\alpha_{\lambda, \mu, \nu}}$ , bu yerda  $A, \alpha, \beta$  - material parametrlari. Barcha natijalar muhit va silindrik jismni quyidagi parametrlari uchun olindi:

- toshdagi po'lat qobiq:  $\rho^* = 3,0, \tau = 0,25, \nu = 0,25 \mu = 0,3$  (1-guruh);
- qattiq grunttdagi beton qobiq:  $\rho^* = 0,84, \tau = 0,25, M = 0,45, \nu = 0,2$  (2-guruh);
- yumshoq grunttdagi beton qobiq:  $\rho^* = 0,84, \tau = 0,45, M = 0,4, \nu = 0,2$  (3-guruh).

Bu ishda  $0,01 < M < 1, M = h/R, A = 0,048; \beta = 0,05; \alpha = 0,1$ .

Sonli natijalar 4-rasmda keltirilgan. Natijalardan ko'rinib turibdiki qobiqdagi kuchlanish komponentalarining qiymatlari muhitning fizik-mexanik parametrlariga va to'liqning tushish burchagiga bog'liq ekan. Silindrik jismning ichki sirtidagi maksimal kuchlanish - kontur kuchlanishi bo'lar ekan.



**4-rasm. Kuchlanish komponentlarini to'liqning tushish burchagiga bog'liq o'zgarishi: 1 va 2-lar birinchi va ikkinchi guruh parametrlari uchun; 3-uchinchi guruh parametrlar**

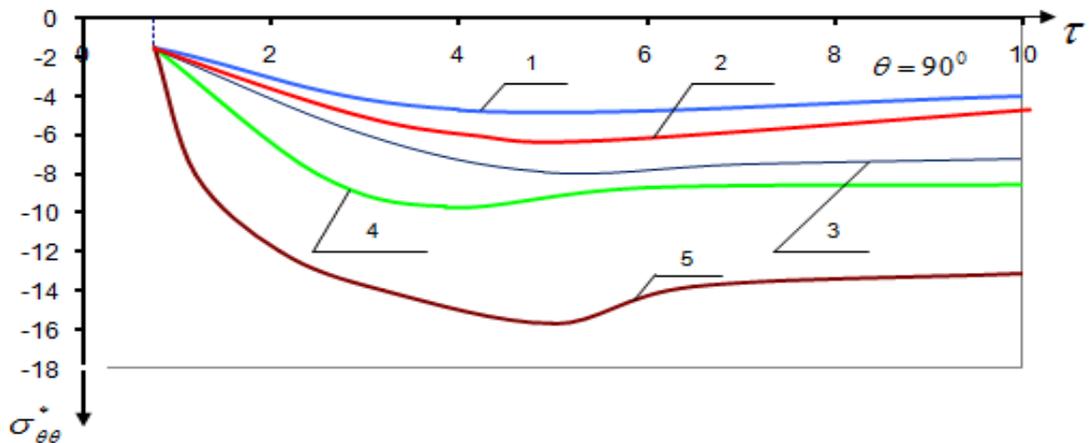
Ko'ndalang to'liqin ta'sirida bo'lgan kontur kuchlanishlari bo'ylama to'liqin ta'siridagi kontur kuchlanishlaridan 15-20% ga kata bo'lishi aniqlandi. Turg'un bo'lmagan to'liqin yuklanganda qo'yilgan masala Fur'e almashtirilishi (13) va (14) qo'langanda teskari almashtirishlar sonli Romberg usuli bilan amalga oshiriladi. Radial  $\sigma_{rr} = \sigma_0 H(t) \cos nt$ , va urinma kuchlanishlar  $\sigma_{r\theta} = \tau_0 H(t) \sin \theta$  bo'lganda kontur kuchlanishlar qo'yidagicha bo'ladi:

$$\sigma_{\theta\theta n}^* = \frac{\sigma_{\theta\theta n}(r_{01}, \theta, t)}{\sigma} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta_1(r_0 \Omega) e^{i\Omega t}}{\Omega_1 [\Delta_2 \Delta_3 + \Delta_4 \Delta_5]} d\Omega, \quad (16)$$

$$\Delta_1(r_{01} \Omega) = (\Delta_3 + \tau_0 E) [2\Omega H_{n-1}^{(1)}(\Omega) - ((2n^2 + 2n) + \Omega^2) H_n^{(1)}(\Omega)] +$$

$$+ [\tau_0 \Delta_2 - \Delta_4] \left[ 2n(n+1)H_n^{(1)}((C_{P1}/C_{S1})\Omega) + \frac{2C_P n \Omega}{C_{S1}} H_{n-1}^{(1)}\left(\frac{C_P}{C_S} \Omega\right) \right].$$

Xususan,  $\alpha > \omega$  da  $q_r^{FF}(\theta, \alpha, \omega)$  funksiya eksponensial ravishda nolga intilganligi sababli, yuqori chegara qiymati chekli son bilan almashtiriladi. Qovushoq- elastik muhitdagi po‘lat qobiqqa normal to‘lqin yuklanganda qobiqdagi kontur kuchlanishining vaqt bo‘yicha o‘zgarishini ko‘ramiz. Kontur kuchlanishining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi 5-rasmda keltirilgan.



**5- rasm. Kontur kuchlanishning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi:** 1-granit-beton-po‘lat; 2-qum-beton-po‘lat; 3-yumshoq grunt-beton-po‘lat; 4-beton-yumshoq grunt- po‘lat; 5-kum-yumshoq grunt-beton.

Turg‘un bo‘lmagan to‘lqinlar yuklanishi ta’sirida  $n=0,1$  bo‘lganda elastik muhitda joylashgan silindrik qatlamdagi olinga natijalar mavjud natijalar bilan 30% gacha farq qilishi va maksimal kontur kuchlanishi  $\theta=90^\circ$  da kuzatilishi aniqlandi.

Dissertatsiyaning “**Qovushoq-elastik muhitdagi ko‘p qatlamli (silindrik va sferik) jismning xos tebranishlari**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida silindrik va sferik jismlarning xos tebranishlari masalasi o‘rganilgan. Cheksiz qovushoq-elastik muhitda joylashgan silindrik bo‘shliqning xos tebranishlarining chastota tenglamasi quyidagicha bo‘ladi:

$$D_\rho = xH_{\rho-1}[(\rho^2 - 1)yH_{\rho-1}(y) - (\rho^3 - \rho + y^2/2)H_\rho(y)] - H_\rho(x)[(\rho^3 - \rho + y^2/2)yH_{\rho-1}(y) - (\rho^2 + \rho - y^2/4)y^2H_\rho(y)] = 0, \quad (17)$$

bu yerda  $x = \omega\alpha(\rho/(\lambda + 2\mu))^{1/2}$ ;  $y = \omega\alpha(\rho/\mu)^{1/2}$ ,  $\lambda$  va  $\mu$  - Lamé koeffitsiyentlari;  $\rho$  - muhit zichligi. Bu tenglama sonli yechilib, olingan natijalar Mao va Pao natijalari bilan solishtirilgan va qoniqarlinatijalar olingan (**1-jadval**).

**1-jadval.** Olingan natijalar Mao va Pao natijalari bilan solishtirish natijalari ( $\nu = 0,25$ )

№	Bizning natijalar	Pao va Mao[35]	Baron va Metyuz [74]
0	0,44741-0.44420 i	0.44647-0.44127 i	0.4464-0.4410 i
1	1,09272-0,77653 i	1.09272-0.7653 i	1.0929-0.441 i
2	1,907554-0,89782 i	1.90754-0.8978 i	1.9076-0.897 i

3	2,75652-0,99151	2.75652-0.9915 i	
4	3,63132-1,06662 i	3.63132-1.0666 i	
5	4.52440-1.13140 i	4.52440-1.1314 i	

Sferoidal tebranishlarni ifodalovchi transtendent tenglama (chastota tenglamasi) ni olish uchun ko‘chishning radial komponentasi ( $rot \vec{u}$ ) ni nolga tenglashtiriladi. U holda sferoidal tebranishlarni ifodalovchi chastota tenglamasi quyidagi determinant shaklida olinadi:

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{vmatrix} = 0, \quad (18)$$

Uning elementlari  $s_{ij}(i=1,2,3,4; j=1,2,3,4)$  quyidagicha bo‘ladi:

$$\begin{aligned} c_{11} &= n - G_i(z_p z_{sp} z_\omega), \quad c_{12} = n(n+1), \quad c_{13} = n - G_h(z_{sp} z_\omega), \quad c_{14} = n(n+1), \\ c_{21} &= 1, \quad c_{22} = n+1 - G_i(z_s z_\omega), \quad c_{23} = 1, \quad c_{24} = n+1 - G_h(z_\omega), \\ c_{31} &= n^2 - n - \frac{1}{2}(z_s z_\omega)^2 + 2G_i(z_p z_{sp} z_\omega), \quad c_{32} = n(n+1)[n-1 - G_i(z_s z_\omega)], \\ c_{33} &= n^2 - n - \frac{1}{2}z_\omega^2 + 2G_h(z_{sp} z_\omega), \quad c_{34} = n(n+1)[n-1 - G_h(z_\omega)], \\ c_{41} &= n-1 - G_i(z_p z_{sp} z_\omega), \quad c_{42} = n^2 - 1 - \frac{1}{2}(z_s z_\omega)^2 + G_i(z_s z_\omega), \\ c_{43} &= n-1 - G_h(z_{sp} z_\omega), \quad c_{44} = n^2 - 1 - \frac{1}{2}z_\omega^2 + G_h(z_\omega). \end{aligned}$$

Bu yerda  $z_p = ((c_{p2} \sqrt{\Gamma_{pk2}}) / (\sqrt{\Gamma_{pk1}} c_{p1}))$  - bo‘ylama to‘lqinlar tezliklari nisbati,  $z_{sp} = ((c_{s2} \sqrt{\Gamma_{sk2}}) / (\sqrt{\Gamma_{pk2}} c_{p2}))$  - ko‘ndalang to‘lqinlar tezliklari nisbati. (14) transtendent tenglamada  $z_\mu \rightarrow 0$  bo‘lganda qobiqning sferoidal tebranishi qaraladi:

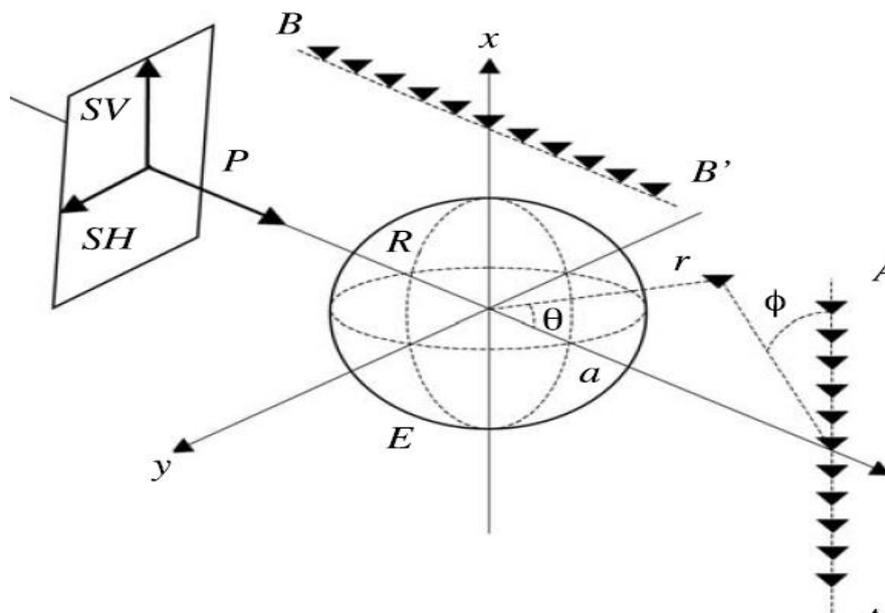
$$\begin{vmatrix} n^2 - n - \frac{1}{2}(z_\omega)^2 + 2G_i(z_{spi} z_\omega) & n(n+1)[n-1 - G_i(z_\omega)] \\ n-1 - G_i(z_{spi} z_\omega) & n^2 - n - \frac{1}{2}(z_\omega)^2 + 2G_i(z_\omega) \end{vmatrix} = 0$$

Bu yerda  $z_{spi} = ((c_{s2i} \sqrt{\Gamma_{sk2i}}) / (\sqrt{\Gamma_{pk2i}} c_{p2i}))$ . Agar  $z_\mu \rightarrow \infty$  bo‘lsa, u holda quyidagi chastota tenglamasiga kelamiz (qovushoq-elastik muhitdagi sferik bo‘shliq uchun):

$$\begin{vmatrix} n^2 - n - \frac{1}{2}(z_\omega)^2 + 2G_h(z_{sph} z_\omega) & n(n+1)[n-1 - G_h(z_\omega)] \\ n-1 - G_h(z_{sph} z_\omega) & n^2 - n - \frac{1}{2}(z_\omega)^2 + 2G_h(z_\omega) \end{vmatrix} = 0.$$

Bu tenglamaning ildizlari sonli (Myuller) usuli yordamida topiladi.

Dissertatsiyaning «**Qovushoq-elastik muhitdagi sferik qobiqning turg‘un bo‘lmagan harakati**» deb nomlangan beshinchi bobida turg‘un bo‘lmagan to‘lqin ta’siridagi sferik qobiqning harakati va dinamik kuchlanganlik-deformatsiya holati o‘rganilgan (6-rasm).



6-rasm. Sferik jismga to‘lqin yuklanishi

Sferik jism va uni o‘rab turuvchi muhitning harakat differensial tenglamasi Lamé tenglamasidan sferik koordinatalar sistemasida keltirib chiqarilgan. Momentsiz nazaryaga asosan qo‘yilgan massalarning tenglamalari keltirib chiqarilgan. U holda sferik jismning harakat differensial tenglamasi quyidagicha bo‘ladi

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + ctg\theta \frac{\partial u}{\partial \theta} - (\nu_0 - ctg\theta)u - (1 + \nu_0) \frac{\partial w}{\partial \theta} - \\
 & - \int_0^t R_u(t - \tau) L_{11}(u, w) d\tau = \frac{1}{c_{10}^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{1}{mc_{10}^2} p_1(a, \theta, t), \\
 & (1 + \nu_0) \left( \frac{\partial u}{\partial \theta} + uctg\theta - 2w \right) - \int_0^t R_w(t - \tau) L_{22}(u, w) d\tau = \\
 & = \frac{1}{c_{10}^2} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{1}{mc_{10}^2} p_2(a, \theta, t),
 \end{aligned} \tag{19}$$

bu yerda

$$\begin{aligned}
 L_{11}(u, w) &= \frac{\partial^2 u(\theta, \tau)}{\partial \theta^2} + ctg\theta \frac{\partial u(\theta, \tau)}{\partial \theta} - (\nu_0 - ctg\theta)u(\theta, \tau) - (1 + \nu_0) \frac{\partial w(\theta, \tau)}{\partial \theta} \\
 L_{22}(u, w) &= (1 + \nu_0) \left( \frac{\partial u(\theta, \tau)}{\partial \theta} + u(\theta, \tau)ctg\theta - 2w(\theta, \tau) \right), \quad m = \rho_0 h, c_{10} = [E_0 / \rho_0 (1 - \nu_0^2)]^{1/2},
 \end{aligned}$$

$E_0, \nu_0, \rho_0$  – mos ravishda oniy elastik moduli, Puasson koeffitsiyenti va sferik jism zichligi;  $R_u(t - \tau), R_w(t - \tau)$  - relaksatsiya yadrolari;  $u, w$  – qobiq o‘rta sirtining urinma va normal yo‘nalishdagi ko‘chishlari;  $\theta$  – burchak.

Qovushoq-elastik muhit va sferik qobiq osesimetirik deformatsiya holatida bo‘lsin. Sferik qobiqqa ta’sir etuvchi yuklanish tushuvchi va qaytgan to‘lqinlar yig‘indisi ko‘rinishida bo‘ladi:

$$p_k(a, \theta, t) = p_{kp}(a, \theta, t) + p_{ka}(a, \theta, t), \kappa = 1, 2.$$

Bu yerda  $p_{kp}$  – tushuvchi to‘lqindan xosil bo‘lgan yuklanish,  $p_{ka}$  – to‘lqin difraksiya natijasida hosil bo‘lgan yuklanish. Olingan harakat differensial tenglamalar sistemasi quyidagi ko‘rinishdagi integro – differensial tenglamalar sistemaga olib kelingan:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_n + C_{10}^2 [n(n+1) - (1 - \nu_0)] u_n - C_{10}^2 (1 + \nu_0) - \int_0^t R_u(t - \tau) L_{11}^\square(u, w) d\tau &= P_{1n}, \\ \ddot{w}_n - C_{10}^2 (1 + \nu_0) [n(n+1) - 2\nu_n] u_n + \int_0^t R_w(t - \tau) L_{22}^\square(u, w) d\tau &= P_{2n}, \\ C_{\alpha 0}^2 \left[ \nabla^2 \Phi(r, t) - \int_0^t R_\alpha(t - \tau) \Phi(r, t) d\tau \right] &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \\ C_{\beta 0}^2 \left[ \nabla^2 \Psi(r, t) - \int_0^t R_\alpha(t - \tau) \Psi(r, t) d\tau \right] &= \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (20)$$

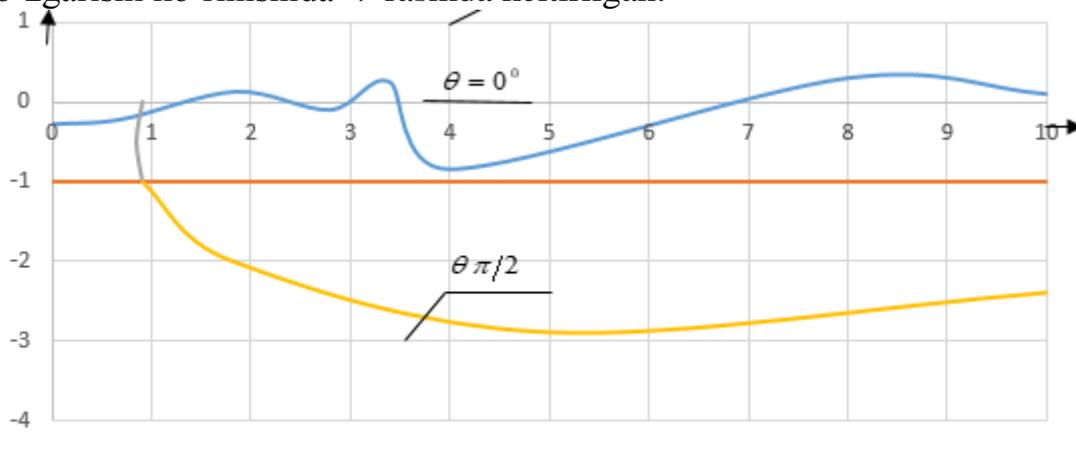
Tushuvchi bo‘ylama to‘lqin birlik funksiya sifatida quyidagicha olindi:

$$\varphi_p = 0.5(t + z - 1)H(t + z - 1), \psi_p = 0. \quad (21)$$

Vaqtning  $t=0$  momentida tushuvchi bo‘ylama to‘lqin qobiq bilan uchrashadi. Laplas almashtirilishi qo‘llab, sferik funksiyaning xossaligidan foydalanib, tasvirni quyidagi ko‘rinishda ifodalaymiz:

$$\varphi_p^L = \frac{e^{-s}}{s^2} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \sqrt{\frac{\pi}{2sr}} I_{n+1/2}(sr) P_n(\cos \theta).$$

Olingan (21) integrodifferensial tenglamalar sistemasi Laplasning integral almashtirilishi usuli bilan yechildi. Teskari almashtirishlar Jordan lemmasi orqali amalga oshirildi. Sonli natijalar sferik qobiqning kontur kuchlanishining vaqtga bog‘liq o‘zgarishi ko‘rinishida 7-rasmda keltirilgan.



**7-rasm. Qobiq kontur kuchlanishining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi**

Shunday qilib, qovushoq-elastik muhitda joylashgan sferik qobiqqa turg‘un bo‘lmagan yuklanishning ta’siri masalasining matematik qo‘yilishi, yechish metodikasi va algoritimi ishlab chiqildi. Turg‘un bo‘lmagan to‘lqinlar tushganda, dastlabki momentda sferik qobiq deyarli bir xilda, har tomonlama siqiladi, so‘ngra harakatning sifat jihatidan yangi bosqichi boshlanadi, bunda kontur kuchlanishlari so‘nadi va sezilarli egilish kuchlanishlari paydo bo‘lishi topildi. Sonli natijalar tahlilidan kelib chiqadiki, dinamik kuchlanishlar va deformatsiya holati sezilarli

darajada tushadigan yuklanishning ko'inishiga va xususiyatlariga hamda qo'yilishiga bogliq ekan.

## XULOSA

1. Qovushqoq- elastik muhitda joylashgan sferik (yoki silindrsimon) ko'p qatlamli konstruksiyalarda to'lqin tarqalishi va diffraksiya masalalarini yechish metodikasi va algoritmlari takomillashtirildi. Ishlab chiqilgan nazariya muhitning reologik xususiyatlarini hisobga olgan holda fazoviy er osti quvurlari va tunnellingning mustahkamligini hisoblash imkonini beradi.

2. Cheksiz muhit bilan aloqa bo'lgan jismlarning xarakterli tebranishlarini o'rganish metodikasi va algoritmi ishlab chiqilgan. Zommerfeldning to'lqinlarini cheksizlikda so'nishini ifodalovchi qisqartirilgan shartlar taklif etilgan. Tavsiya etilgan qisqartirilgan shartlar cheksizlikdagi to'lqinlarning so'nishini hisobga oladi.

3. Muhit elastiklik modulining ortishi murakkab xos qiymatlar qiymatlarining bevosita ortishiga olib kelishi aniqlandi. Muhitning elastik modulining oshishi Puasson koeffitsienti qiymatining o'zgarishiga 10% gacha ta'sir qiladi.

4. Qobiq qalinligining oshirish bilan xos chastotalar qiymatlari haqiqiy va mavhum qismlarining oshishi aniqlandi. Qobiq qalinligining oshishi birinchi chastota qiymatining 20% ga, ikkinchi chastotaning 5-10% ga oshishiga olib keladi va uchinchi chastotaning qiymati deyarli o'zgarmaydi.

5. Ko'ndalang to'lqinlar ta'siridagi kontur kuchlanishlari bo'ylama to'lqinlar ta'siridagi kontur kuchlanishlaridan 15-20% ko'proq ekanligi aniqlandi. Topilgan natijalar er osti inshootlarining mustahkamligini oshirish uchun ishlatiladigan yumshoq tuproq yuqori chastota diapazonida ta'sir qilish uchun samarali degan xulosaga kelishimizga imkon beradi.

6. Murakkab silindrsimon jismning deformatsiyalanuvchi muhitda suyuqlik bilan nostatsionar to'lqin yuklanishi natijasida kuchlanish-deformatsiya holatining (KDH) o'zgarishi aniqlandi. Kuchlanish-deformatsiya holatining aniqlangan o'zgarishi silindrsimon qatlamda bo'ylama nostatsionar yuklanish ostida eng yuqori kuchlanishlarga erishilishini aniqlash imkonini berdi.

7. Ko'ndalang to'lqinli yuklanish ta'sirida elastik muhitda joylashgan silindrning ichki va tashqi yuzalarida kuchlanishning farqi aniqlandi. Silindrning ichki va tashqi yuzalarida kuchlanishning ma'lum bir farqi o'rta sirdagi kuchlanish farqiga teng bo'lishini aniqlash imkonini berdi.

8. Faza tezligining chastotaga nisbatan dispersiya munosabati uchun analitik ifoda olinadi. Olingan analitik ifoda devor qalinligi nolga intilganda yagona mumkin bo'lgan Lemb to'lqinlari (quvur to'lqini) ni aniqlash imkonini beradi.



**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПРИ НАУЧНОМ СОВЕТЕ  
DSc.02/30.12.2019. T/FM.61.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ  
СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ МЕХАНИКИ И  
СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**КУЛДАШОВ НАСРИДДИН УРИНОВИЧ**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМЫ ДИФРАКЦИИ И  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ВЯЗКОУПРУГИХ ТЕЛАХ  
СФЕРИЧЕСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА НАУК (DSc)  
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент– 2024

**Тема диссертации доктора наук (DSc) за регистрирована в Высшей  
Аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций  
Республики Узбекистан под номером B2021.1.DSc/FM171.**

---

Диссертация выполнена в Ташкентском химико-технологическом институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета ([www.insmech.uz](http://www.insmech.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Научный консультант:**

**Сафаров Исмоил Иброхимович**  
доктор физико-математических наук, проф.

**Официальные оппоненты:**

**Мардонов Ботир Мардонович**  
доктор физико-математических наук, проф.

**Мирзаев Ибрагим Каримович**  
доктор физико-математических наук, проф.

**Юлдашев Шарофитдин Саифитдинович**  
доктор технических наук, проф.

**Ведущая организация:**

**Национальный университет Узбекистана**

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024г. в «\_\_\_» часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз по адресу: г.Ташкент, улица. Яхья Гуломова 70. Тел.: (+99871) 233-68-47; факс: (+99871) 233-74-82, e-mail: [konselyaria@academy.uz](mailto:konselyaria@academy.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз (зарегистрирована за № \_\_\_\_). (Адрес: 100047. г.Ташкент, улица. Яхья Гуломова 70. Тел.: (+99871) 233-68-47; факс: (+99871) 233-74-82, e-mail: [konselyaria@academy.uz](mailto:konselyaria@academy.uz)).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_ 2024 года.

(номер, Протокол рассылки № «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.)

**М.М. Мирсаидов**

Председатель разового Научного совета по  
присуждению ученых степеней д.т.н.,  
профессор академик АН РУз

**М.К. Усаров**

Ученый секретарь разового Научного совета по  
присуждению ученых степеней д.ф.-м.н., профессор

**Р.А. Абиров**

Председатель Научного семинара при  
Научном совете по присуждению  
ученых степеней, д,ф.-м.н., с.н.с.

## **ВВЕДЕНИЕ (Аннотация докторской (DSc) диссертации)**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире одной из наиболее важных проблем является обеспечение сейсмостойкости строительства подземных сооружений, возводимых в сейсмоактивных регионах. Поэтому уделяется большое внимание к изучению напряжений и деформаций, а также дифракции волн в подземных сооружениях, возникающих при воздействии взрывных и сейсмических волн. В связи с этим, для предотвращения резонансных явлений, возникающих при воздействии динамических нагрузок на многих конструктивных элементах современных подземных сооружений, при создании конструкций нового поколения, чтобы возникающие напряжения и деформации не превышали допустимых пределов, знание процесса распространения и дифракции волн в них, оптимизация конструктивных решений занимает особое место. В этом отношении во многих зарубежных странах, включая США, Германии, России, Китай и других промышленно развитых странах, особое внимание уделяется разработке усовершенствованных математических моделей, эффективных вычислительных методов, проблеме целенаправленного управления энергией при воздействии и распространении волн, с целью достижения повышения прочности и конкурентоспособности конструкций.

В мире проводятся целенаправленные научные исследования по разработке методов и программ для решения проблем, которые определяются такими факторами, структурной неоднородностью реологических свойств композиционных материалов, а также их взаимодействие с окружающей деформируемой средой. В этом направлении, в частности, приоритетными считаются исследования по целенаправленному научному исследованию спектральных характеристик оболочечных конструкций, взаимодействующих со средой, а также по анализу диссипативных свойств элементов конструкции.

В нашей республике уделяется особое внимание развитию строительства и совершенствованию обеспечения прочности строящихся объектов подземных сооружений, находящихся под различным динамическим воздействием. Поэтому проведение научно-исследовательских работ по данному направлению имеет важное научно-практическое значение.

Данная научно-исследовательская работа служит в определенной степени реализации задач, намеченных в Указе Президента Республики Узбекистан №ПФ-144 от 30 мая 2022 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности Республики Узбекистан», Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПQ -158 от 16 мая 2023 года «Сейсмическая безопасность населения и территории Республики Узбекистан», в Постановлении Президента Республики Узбекистан от 17 апреля 2024 года № PQ-161 «О мерах по повышению сейсмостойкости зданий и сооружений и совершенствованию мониторинга сейсмического риска» и в других нормативных правовых документах, связанных с этими сферами деятельности.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Данное диссертационное исследование осуществлено в рамках приоритетного направления развития науки и технологий Республики IV.«Математика, механика, сейсמודинамика конструкций и информатика».

**Обзор международных научных исследований по теме диссертации<sup>2</sup>.** Научно - исследовательские работы по проблеме “Научные основы дифракции и распространения волн в вязкоупругих телах сферической и цилиндрической форм” ведутся во многих научных центрах, высших образовательных учреждениях США (в Ohio university, штат Огайё Нью-Йорк; Texas university, Остин, штат Техас), Индии (Технический университет имени Р.Ганди, Бхопал; Технологический университет, Канпур), Ирана (Университет Тегеран, Тегеран), России (Саратовский госуниверситет имени Н.Г. Чернышевского; Томский политехнический университет, Санкт-Петербургский технический университет; МГУ им. М. В. Ломоносова; Московский государственный институт электроники и математики; Сибирское отделение РАН), Армении (Институт механики НАН Армении), Англии (Oxford university), Украины (Институт гидромеханики НАН Украины; Институт механики имени С.П. Тимошенко НАН Украины), Белорусский государственный университет, Минск), Азербайджана (НАН Азербайджана), Казахстана (Международный казахско-тюркский университет им. А. Яссави, Туркестан), Бразилии (Католический университет, Рио-де-Жанейро). В этих странах проводятся научные исследования по взаимодействию волн с различными сооружениями, с учетом физических и геометрических свойств. В вышеназванных исследованиях, в основном, рассматривается задачи распространения и дифракции плоских волн, учитываются внутренние трения.

Также исследуется задачи воздействия нестационарных и гармонических волн на оболочку с протекающей жидкостью. При этом во многих работах рассматривается идеальная жидкость. В последнее время тонкая оболочка заполненный вязкой жидкостью становится толстыми. Поставленная задача решается с помощью потенциалов перемещений в цилиндрических координатах. Дисперсионное уравнение получено в специальных функциях уравнений математической физики (цилиндрические функции Бесселя и Ханкеля) с комплексными входящими параметрами[ ]. Основной анализ численных решений сделан для асимптотических значений специальных функций (большого и малого значения аргумента) математической физики. Распространение собственных волн на слоистых волноводах также рассматривается в линейной постановке (для диссипативно- однородных или неоднородных тел) и решается в потенциалах перемещений (в декартовых или цилиндрических координатах).

Исследованию пространственных задач взаимодействия волн с различными вязкоупругими телами в опубликованных работах обращено мало внимания.

В частности, для плоских плоско деформированных неоднородных получены некоторые численные результаты. Существуют некоторые теоретические и

экспериментальные результаты для плоских задач, полученные учеными США (Университет Бронкс, штат Нью-Йорк; Калифорнийский технологический институт, Пасадена, штат Калифорния), России (Южно Уральский университет, Челябинск; Московский институт электронного машиностроения, кафедра «Математическое моделирование физико-механических систем»; МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет; Московский авиационный институт), Украины (Институт механики имени С.П. Тимошенко НАН, Киев), Китая (Гербинский технологический университет), Болгарии (Институт механики и биомеханики АН Болгарии).

Исследования по дифракции волн в деформируемых телах с учетом реологических свойств материала полностью еще не нашли своего решения. Кроме того, до настоящего времени не разработаны математическая постановка задач дифракции волн в диссипативно-неоднородных механических системах и алгоритмы их решения. Также для вязкоупругих тел до настоящего времени полностью не разработаны математическая постановка и решение задач по выбору ядер и ее реологических параметров, а также не исследованы их влияния на напряженно - деформированное состояние механической системы и скорости демпфирования.

**Степень изученности проблемы.** Многие известные в мире ученые, в частности, Ильюшин А.А., Бреховских Л.В., Викторов И.А., Горшков А.Г., Вольмир А.С., Генкин М.Д., Шемякин Е.И., Гузь А.Н., Гринченко В.Т., Гоголадзе В.Г., Трояновский И.Е., Кийко И.А., Молотков Л.А., Новичков Ю.И., Петрашень Г.И., Крауклис П.В., Фролов К.В., Антонов А.Н., Матвиенко В.П., Шардаков И.Н., Старовойтов Э.И., Дейвис Р.М., Митра Р., Кольский Г., Уайт, Ахенбах Ж.Д., Шафер Б.В., Сан Р.И.<sup>4</sup>, в том числе узбекские ученые Рахматулин Х.А., Уразбаев М.Т., Ширинкулов Т.Ш., Кабулов В.К., Рашидов Т.Р., Мубараков Я.Н., Мардонов Б.М., Султанов К.С., Маматкулов Ш.М., Мирсаидов М.М., Мирзаев И.К., Бадалов Ф.Б., Хожметов Г.Х., Ишанходжаев А.А., Мавлонов Т.М., Абдусаторов А., Сафаров И.И., Худайназаров Х., Хасанов Б.Э., Тешаев М.Х., Усаров М.К., Б.Ш. Усмонов, Юлдашев Ш.С. и другие проводили научные анализы колебаний пластинчатых и оболочечных механических систем при различных воздействиях с учетом диссипативных свойств материала. В настоящее время существует ряд проблем с динамикой диссипативных систем, связанных с неограниченности упругих сред, решение которых позволяет открыть новые закономерности колебаний и дифракции волн. Создание надежных методик и алгоритмов

способных решать многие проблемы динамической прочности и устойчивости, в частности, в машиностроении и строительстве подземных сооружений.

---

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ.** Данное диссертационное исследование выполнено в соответствии с научно-технической программой НИР «Научные и практические проблемы математики», на 2015-2024 годы в Ташкентском химико-технологическом институте.

**Целью исследования** является развитие теоретических основ и методов решений динамики вязкоупругих (структурно- однородных и неоднородных) механических систем применительно к цилиндрическим и сферическим телам, связанным с неограниченной деформируемой средой.

**Задачи исследования:**

- построить обобщенную математическую модель для оценки динамического поведения, напряженно- деформированного состояния (НДС) вязкоупругих цилиндрических (сферических) тел, находящихся во взаимодействии с деформируемой средой при поверхностных (или объемных) волновых воздействиях;

- разработать математическую постановку, методику и алгоритм решения задач для исследования собственных и вынужденных колебаний вязкоупругих цилиндрических (сферических) оболочек с учетом диссипации энергии;

- сравнительно оценить НДС цилиндрических (сферических) тел с учетом их структурной однородностью и неоднородностью при воздействии объёмных волн;

- оценить влияние поверхностных волн Рэлея на НДС заглубленной цилиндрической оболочки;

- оценить возможности появления «трубной и водной» волн в вязкоупругой цилиндрической оболочке, взаимодействующей с неограниченной деформируемой средой;

- обосновать условия излучения Зоммерфельда при собственных колебаниях цилиндрических или сферических тел, взаимодействующих с упругой (или вязкоупругой) средой.

- оценка влияния реальной и мнимой частей значений характеристических частот при увеличении толщины оболочки.

**Объектом исследования** являются многослойные цилиндрические и сферические тела, находящиеся в вязкоупругой среде.

**Предметом исследования** является развитие математических моделей и методов решения задач динамики вязкоупругих (структурно- однородных и неоднородных) механических систем применительно к цилиндрическим и сферическим телам, связанным с неограниченной деформируемой средой.

**Методы исследования.** При исследованиях использованы методы уравнений математической физики, методы интегрального преобразования (Фурье и Лапласа), метод замораживания, метод Мюллера, метод Гаусса, метод ортогональной прогонки Годунова.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- разработаны теоретические основы и обобщены математические модели для оценки динамического поведения, НДС вязкоупругих цилиндрических (сферических) тел, находящихся во взаимодействии с деформируемой средой при поверхностных (или объемных) волновых воздействиях;
- разработаны математическая постановка, методики и алгоритм решения задач для исследования собственных и вынужденных колебаний вязкоупругих цилиндрических (сферических) тел (оболочек) с учетом диссипации энергии;
- сравнительно оценены НДС цилиндрических (сферических) тел с учетом их структурной однородности и неоднородности воздействия объемных волн;
- исследованы влияния параметров поверхностных волн Рэлея на НДС заглубленной цилиндрической оболочки;
- дана оценка возможности появления «трубной и водной» волн в вязкоупругих цилиндрических оболочках, взаимодействующей с неограниченной деформируемой средой;
- определено, что увеличиваются значения действительной и мнимой частей собственных частот при увеличении толщины оболочки. В результате определено, что значение первой частоты увеличивается на 20%, второй частоты- на 5-10%, а значение третьей частоты не меняется.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

- полученные новые эффекты (о немонотонной зависимости коэффициента затухания или скорости затухания в зависимости от различных параметров) могут быть использованы при решении практических задач в различных областях машиностроения и строительства, а также при внедрении новой техники и технологии;
- разработанные методы и полученные результаты для цилиндрических тел с жидкостью будут успешно применены при решении практических задач в различных отраслях;
- разработанные методы и полученные результаты призваны способствовать снижению НДС подземных сооружений, а также оптимизировать диссипативные свойства механической системы.

**Достоверность полученных результатов.** Обосновывается корректной постановкой краевых задач, строгостью выводимых математических выражений, с использованием обоснованных методов решения, оценкой точности решений и сопоставлением с решениями, полученными другими авторами.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Теоретическая значимость полученных результатов состоит в том, что они вносят важный вклад в развитие динамической теории диссипативных (однородных и неоднородных) протяженных механических систем.

Практическая ценность работы заключается в разработке методики и алгоритма для динамического расчета напряженно-деформированного состояния и оптимизации демпфирующих свойств механической системы в целом.

Определены параметры механической системы, обеспечивающие наибольшую поглощающую способность колебаний слоистых диссипативных тел. Найденные собственные частоты тела (цилиндрических и сферических форм) открывают широкие перспективы для создания новых типов конструкций.

**Внедрение результатов исследования.** Разработанные по теме “Научные основы дифракции и распространения волн в вязкоупругих телах сферической и цилиндрической форм” методики и алгоритмы расчетов применены:

При выполнении проекта F-4-14 “Развитие теории и разработка методов исследования динамического напряженно–деформированного состояния криволинейных участков тонкостенных подземных трубопроводов с протекающей жидкостью при воздействии динамических нагрузок”, выполненном в 2012-2016-г.г. в Бухарском инженерно–технологическом институте (Справка 04/05-87/966 2023г. 14 июня).

Разработанные методы определения комплексных частот и собственных форм использованы в фундаментальном проекте OT-F4-01 “Развитие теории и разработка методов изучения нелинейных динамических напряженно-деформационных состояний композитных многослойных труб с протекающей вязкой жидкостью под воздействием температурных и динамических нагрузок”, выполненном в 2016-2020 годах в рамках Государственной научно - технической программы в Ташкентском химико-технологическом институте (Справка № 1/01-2041 от 16 июня 2023 года). В результате появилась возможность предварительной оценки напряженно -деформированного состояния в диссипативных однородных или неоднородных системах, работающих под нагрузкой.

В Главном управлении строительства автомобильных дорог Сурхандаринской области диссертация Н.У. Кулдашова по теме “Научные основы дифракции и распространения волн в вязкоупругих телах сферической и цилиндрической форм” была применена при решении вопроса о заполнителях для цилиндрических оболочек (Справка № 10/3-429 от 2 августа 2023 года). В результате появилась возможность предварительной оценки сейсмического состояния подземных цилиндрических сооружений взаимодействующих сейсмическими воздействиями.

**Апробация работы.** Результаты исследования доложены в 17 международных и 11 республиканских конференциях.

**Полное содержание диссертационной работы доложено и обсуждено на:**

- научном межвузовском семинаре при Ташкентском химико-технологическом институте (протокол №8 от 14 октября 2023 года);
- Республиканском научном семинаре “Проблемы механики” при кафедре “Механика и компьютерное моделирование” Национального исследовательского университета “Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства” (протокол №20 от 27 апреля 2024 года).

**Опубликованность результатов.**

По теме диссертация опубликовано 28 научных работ, из них 18- научные статьи, в том числе 5- в республиканских и 13- в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 188 страниц и включает 52 рисунок, 6 таблица и списка цитируемой литературы из 150 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во введении обосновываются актуальность и необходимость диссертационного исследования, формируются цель и задачи, объект и предмет исследования. Показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, описаны научная новизна и практические результаты исследования. Обоснована достоверность полученных результатов, подчеркнута их научная и практическая значимость. Представлена информация о внедрении результатов исследования, об апробации работы, опубликованных работах, структуре и объеме диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ современного состояния изучения дифракции и распространения волн в вязкоупругих телах сферической и цилиндрической форм»** представлен краткий анализ литературы, посвященной изучению вопросов распространения и дифракции волн в упругих и вязкоупругих сферических и цилиндрических телах. На основании анализа литературы были сделаны выводы: интегро-дифференциальные уравнения в частных производных, представляющие собой исследование распространения волн и дифракции в вязкоупругих сферических и цилиндрических телах, не построены в общем виде с учетом диссипативных свойств материалов, методика и алгоритм решения этой проблемы не разработаны; дисперсионное уравнение, выражающее свободное распространение волн в вязкоупругой многослойной цилиндрической (или сферической) оболочке, не получены в общем виде на основе уравнения Ламе, заданного в виде оператора, не были разработаны методика и алгоритм решения; не были поставлены краевая задача; представляющая распространение волн, и вытекающая из нее спектральная задача, не были разработаны методика и алгоритм решения; недостаточно исследований проведено по трубным волнам и их рассеянию.

Таким образом, хотя исследованию распространения волн и дифракции в вязкоупругих, деформируемых сферических и цилиндрических телах посвящено большое количество научных работ, из выводов, сделанных по итогам анализа литературы, следует, что эта проблема далека от своего окончательного решения. Показано, что создание теоретической основы решения данной задачи, постановка краевой задачи, разработка методики, алгоритма решения и программ являются актуальной задачей.

Во второй главе «Постановка задачи, методика и алгоритм решения задач о дифракции и рассеянии волн на вязкоупругих сферических и цилиндрических телах», представлены математическая постановка, методика и алгоритм решения задач.

Получены дифференциальные уравнения движения нелинейных прямолинейных цилиндрических и искривленных многослойных композитных цилиндрических (или сферических) оболочек, начальные и граничные условия, применяемые принципы и методы. Выведены нелинейные дифференциальные уравнения движения для криволинейных (и прямолинейных) участков многослойной композитной цилиндрической трубы с протекающей вязкой жидкостью, большого диаметра, представлена расчетная схема (рис.1).

Рассматривается задача о волновом нагружении на многослойное вязкоупругое цилиндрическое (или сферическое) тело толщиной  $h$ . В декартовой системе координат  $(Oxyz)$  слой занимает область:  $x \in (-\infty, +\infty)$ ,  $y \in (-\infty, +\infty)$ ,  $z \in [-h, h]$  (рис.1).

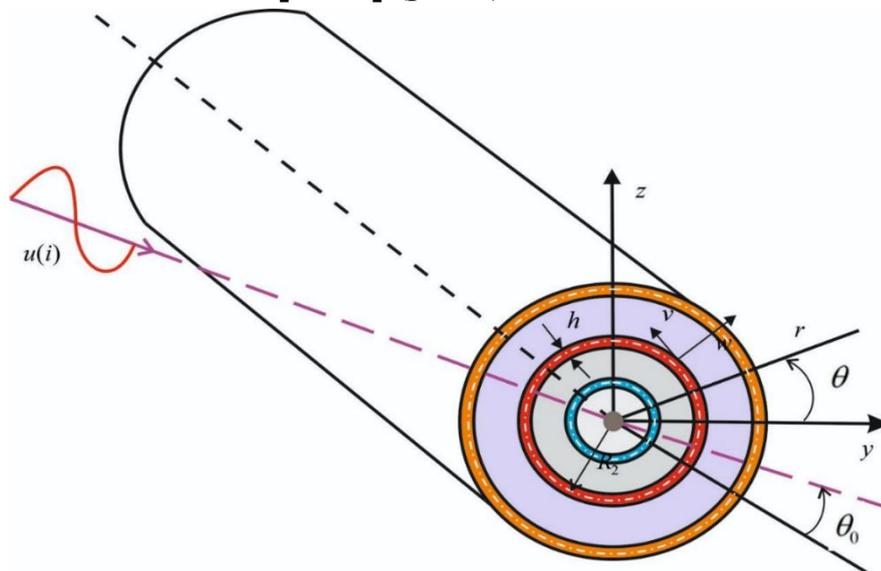


Рис. 1. Схема расчета многослойной цилиндрической трубы

Задача распространения волн в цилиндрическом теле исследуется с помощью системы интегро-дифференциальных уравнений Ламе в частных производных теории вязкоупругости:

$$\tilde{\mu}_k \nabla^2 \vec{u} + (\tilde{\lambda}_k + \tilde{\mu}_k) \text{grad div } \vec{u} = \rho_k \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}, (k=1,2) \quad (1)$$

$$\tilde{\lambda}_k f(t) = \lambda_{0k} \left[ f(t) - \int_0^t R_{\lambda k}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \quad \tilde{\mu}_k f(t) = \mu_{0k} \left[ f(t) - \int_0^t R_{\mu k}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right].$$

Здесь  $f(t)$ -произвольная функция времени,  $R_{\lambda k}(t-\tau)$  и  $R_{\mu k}(t-\tau)$  - ядра релаксации,  $\lambda_{0k}$ ,  $\mu_{0k}$  - мгновенные модули упругости,  $\vec{u}(u_n, u_{s1}, u_{s2})$  -вектор смещений.

На внутреннюю поверхность цилиндрического тела наложено условие свободы от напряжений:

$$p = R_{\kappa+1}; \quad \sigma_{rr(\kappa+1)} = 0; \quad \sigma_{r\theta(\kappa+1)} = 0; \quad \sigma_{rz(\kappa+1)} = 0. \quad (2)$$

Пусть вязкоупругое цилиндрическое тело состоит из деформируемых слоев. Если цилиндрическая поверхность жестко закреплена на границе среды, то соответствующие компоненты тензора напряжения и вектора смещения равны:

$$\begin{aligned} r = R_{\kappa}; \quad \sigma_{rr\kappa} = \sigma_{rr(\kappa+1)}; \quad \sigma_{r\theta\kappa} = \sigma_{r\theta(\kappa+1)}; \quad \sigma_{rz\kappa} = \sigma_{rz(\kappa+1)}; \\ u_{\kappa} = u_{\kappa+1}; \quad \mathcal{G}_{\kappa} = \mathcal{G}_{\kappa+1}; \quad w_{\kappa} = w_{\kappa+1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если между слоями накладывается условие скольжения между слоями (при отсутствии сопротивления между слоями), то имеем

$$\begin{aligned} r = a_{\kappa}; \quad \sigma_{rr\kappa} = \sigma_{rr(\kappa+1)}; \quad \sigma_{r\theta\kappa} = \sigma_{rz\kappa} = 0; \\ \sigma_{r\theta(\kappa+1)} = \sigma_{rz(\kappa+1)} = 0; \quad w_{\kappa} = w_{\kappa+1}. \end{aligned} \quad (4)$$

На бесконечности налагается условие поглощения Зоммерфельда:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \varphi_1 = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} (\sqrt{r}) \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} + i\alpha_1 \varphi_1 \right) = 0, \quad (5)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \psi_1 = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} (\sqrt{r}) \left( \frac{\partial \psi_1}{\partial r} + i\beta_1 \psi_1 \right) = 0.$$

Рассмотрим задачу распределения волнового нагружения, падающего на оболочку с заполнителем. Цилиндрические волны, распространяющиеся в среде, для случая плоской деформации имеют вид:

$$\varphi_N^{(p)} = \varphi_0 i\pi \sum_{n=1}^{\infty} [(-1)^n E_n J_n(\alpha_N r) H_n^{(1)}(\alpha_N z)] \cos n\theta e^{-i\omega t}, \quad (6)$$

где  $E_n = \{1, n=0; 2, n \geq 1\}$ ,  $J_n$  – цилиндрическая функция Бесселя:

$$S_{2n} = 2\mu_r \left( i\alpha - \frac{1}{r} \right) E_{n1} n J_n(\gamma r); \quad S_{3n} = 2\mu_r (i\alpha) n E_{n1} J_n(\gamma r).$$

Основная цель – разработка методики и алгоритма определения напряженно-деформированного состояния многослойного цилиндрического тела и среды под воздействием гармонических (длинноволновых сейсмических) и неустановившихся волн.

Если падающая волна является слабой ударной продольной волной, то она будет иметь потенциал вида:

$$\begin{aligned} \phi_0(L, t) = \phi_0(R, \theta, Z, t) = \phi_* L^{-1} f(t - L/c_L) [H(t - L/c_L) - H(t - L/c_L - t_*)], \\ L = (Z^2 + R^2 + R_*^2 - 2RR_* \cos \theta)^{1/2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $L$  – расстояние от источника волны до тела;  $R, \theta, Z$  – переменные в цилиндрической системе координат,  $t$  – время;  $t_*$  – период воздействия;  $c_L$  – скорость

распространения продольных волн в материале;  $\phi_*$  — нормирующее количество;  
 $H(t)$  - Функция Хевисайда.

Если рассматривать задачу о распространении собственных волн, то для решения уравнений (1) следует исходить из граничных условий (2)-(4). Предполагая, что интегральные значения малы, задача решается методом замораживания, разработанным Филатовым А. и Сунчалиевым Р.М.

Предлагаем методику решения данной задачи. Поставленная задача выражается в потенциалах перемещений, дисперсионное соотношение комплексного параметра получается аналитически и решается численно. Если описать полученное уравнение (5) как сумму потенциальной и соленоидной форме вектора смещения, то смещение слоев выражается в виде:

$$\vec{u}_k = \text{grad} \varphi_k + \text{rot} \vec{\psi}_k, \quad \text{div} \vec{\psi}_k = 0. \quad (8)$$

Здесь  $\varphi_k$  - продольный волновой потенциал и  $\vec{\psi}_k(\psi_{rk}, \psi_{\theta k}, \psi_{zk})$  - поперечный волновой потенциал, которые удовлетворяют системе дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi_k - \frac{1}{\bar{c}_{pk}^2} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \psi_{zk} - \frac{1}{\bar{c}_{sk}^2} \frac{\partial^2 \psi_{zk}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \psi_{\theta k} - \frac{\psi_{\theta k}}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{rk}}{\partial \theta} - \frac{1}{\bar{c}_{sk}^2} \frac{\partial^2 \psi_{\theta k}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \psi_{rk} - \frac{\psi_{rk}}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{\theta k}}{\partial \theta} - \frac{1}{\bar{c}_{sk}^2} \frac{\partial^2 \psi_{rk}}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\bar{c}_{sk}^2 = c_{sk}^2 \Gamma_k^*$ ,  $\bar{c}_{pk}^2 = c_{pk}^2 \Gamma_k^*$ . Тогда решение дифференциальных уравнений (9) ищем в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \phi_n(\alpha_k r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}, \\ \psi_{rk}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{nr}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ -\cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}, \\ \psi_{\theta k}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{n\theta}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}, \\ \psi_{zk}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{nz}(\beta_k r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ \cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}. \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Здесь  $n$  - целое число,  $\gamma_{pk}$  - постоянное число распространения волны,  $\omega$  -

комплексная собственная частота,  $r = \frac{r_1}{a_0}$ ,  $z = \frac{z_1}{a_0}$ . Подставив (10) в (9), получим следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \phi_k}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\phi_k}{dr} + \left( \alpha_k^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \phi_k &= 0, \\ \frac{d^2 \psi_{zk}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{zk}}{dr} + \left( \beta_k^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \psi_{zk} &= 0, \\ \frac{d^2 \psi_{\theta k}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{\theta k}}{dr} + \frac{1}{r^2} \left( -n^2 \psi_{\theta k} + 2n \psi_{\theta k} - \psi_{\theta k} \right) \beta^2 \psi_{\theta k} &= 0, \\ \frac{d^2 \psi_{rk}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{rk}}{dr} + \frac{1}{r^2} \left( -n^2 \psi_{rk} + 2n \psi_{\theta k} - \psi_{rk} \right) \beta^2 \psi_{rk} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь  $\alpha_k^2 = \frac{\bar{\Omega}_k^2}{\gamma_k^2} - \gamma_p^2$ ,  $\beta_k^2 = \bar{\Omega}_k^2 - \gamma_p^2$ ,  $\bar{\Omega}_k = \frac{\omega \alpha_k}{c_{sk}}$ ,  $\gamma_k^2 = \frac{2(1-\nu_k)}{1-2\nu_k}$ .

Решения первых двух уравнений в уравнениях (11) ищем для первого ( $k=1$ ) и внешнего цилиндров ( $k=N$ ) в следующем виде:

$$\phi_k(r) = F_{nk} J_n(\alpha_k r) + F'_{nk} N_n(\alpha_k r), \quad \psi_{zk}(r) = M_{1k} H_n^{(1)}(\beta_k r) + M'_{1k} H_n^{(2)}(\beta_k r),$$

где  $J_n(\alpha_k r)$ -функция Бесселя  $n$ -го рода,  $H_n^{(1,2)}(\beta_k r)$ -функция Ханкеля первого и второго типов  $n$ -го рода. Для решения двух последних уравнений (9) используем возможность выбора произвольным образом одной из произвольных констант и предполагаем далее:  $L_{1k} = L'_{1k} = 0$ ,  $\psi_{rk} = -\psi_{\theta k}$ .

Таким образом, сформулирована спектральная краевая задача, представляющая распространение гармонической волны в вязкоупругой цилиндрической оболочке бесконечной длины. Задача решается по разработанной методике, состоящей из вычисления специальных функций, методом замораживания, комбинированным использованием методов Гаусса, Лапласа и Мюллера в комплексной арифметике.

Если использовать граничные условия (2)–(5) для нахождения произвольных констант, то получим систему неоднородных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами

$$[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)] \{q\} = \{P_1\},$$

где  $\{q\}$ - вектор-столбец, состоящий из произвольных постоянных,  $\{R\}$ - вектор-столбец падающих волн;  $[C_1]$ -квадратная матрица, элементы которой состоят из функций Бесселя и Ханкеля.

Дисперсионное уравнение для решения задачи о распространении собственных волн в протяженных цилиндрических вязкоупругих оболочках будет выглядеть следующим образом:

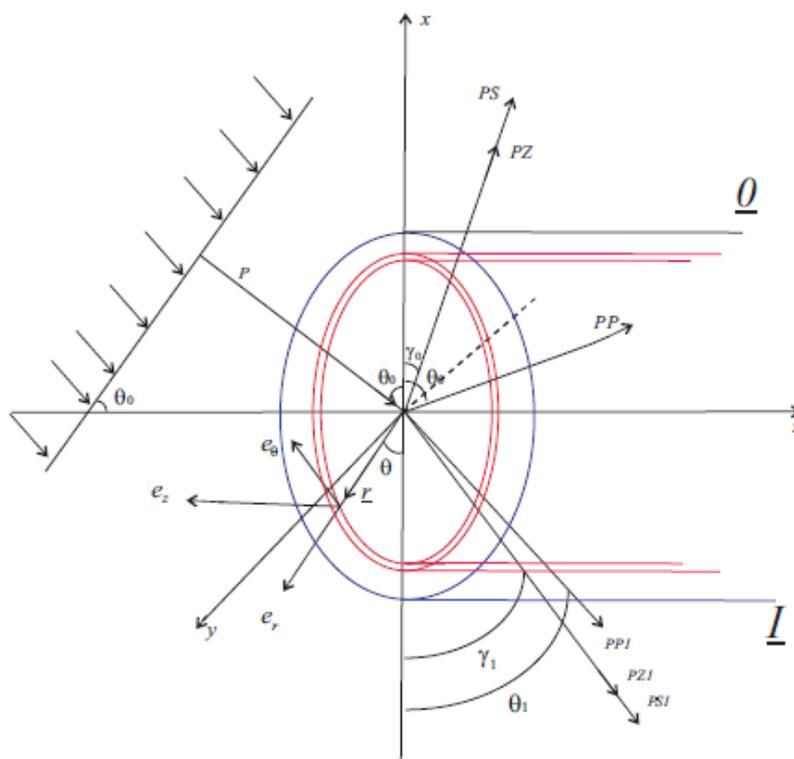
$$\det[R(k, \omega)] = 0. \quad (12)$$

Корни уравнения (12) будут комплексными ( $k_j = k_j(\omega) = \text{Re} k_j(\omega) + i \text{Im} k_j(\omega)$ ,  $j = 1 \dots n$ ).

Задача решается по методике и алгоритму, основанным на методе Мюллера, Лапласа, Гаусса с помощью, преобразований Фурье и специальных функций на комплексной арифметике. На основе использованного алгоритма разработана программа на языке C<sup>++</sup>. Для решения тестовых задач также использовались программные комплексы MAPLE-18 и MATLAB.

Таким образом, во второй главе при решении задач о волновом нагружении (и дифракции) с помощью уравнения Ламе, выраженного через смещения, получена система интегро - дифференциальных уравнений в частных производных, выраженных через потенциалы смещения, а аналитическое решение находится по методике и алгоритму, разработанным на основе методов замораживания, Гаусса, интегрального преобразования Фурье, Лапласа и специальных функций.

В третьей главе диссертации «Динамически напряженно – деформированные состояние структурно- неоднородных многослойных цилиндрических тел при воздействии гармонических и нестационарных волн» представлено решение задачи о гармоническом и неустойчившемся волновом нагружении в вязкоупругом цилиндрическом теле и дан анализ численных результатов (рис. 2).



**Рис 2. Расчетная схема волнового нагружения в цилиндрической оболочке**

Расчеты проводились с использованием алгоритмов и программ, разработанных на основе метода Гаусса и специальных функций, представленных во второй главе. Смещение произвольного k-го слоя цилиндра

выражаются с помощью функций Бесселя и Неймана комплексного аргумента  $n$ -го порядка:

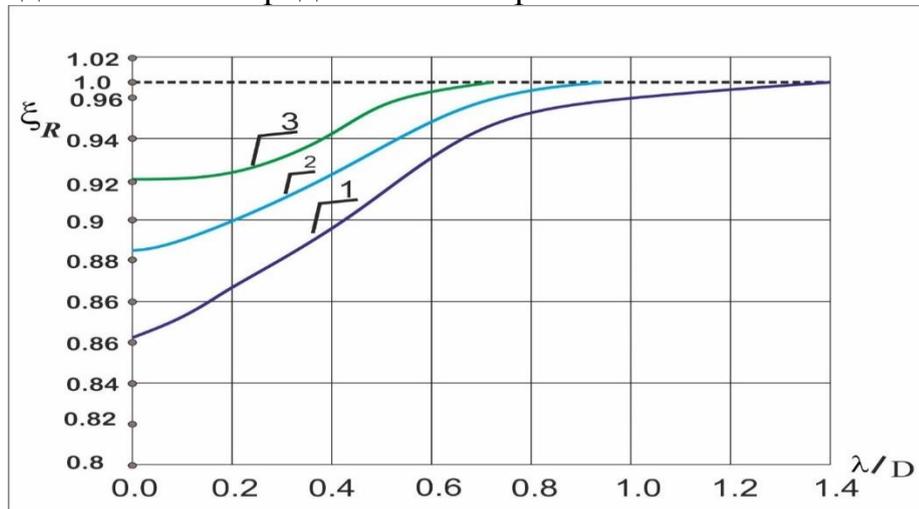
$$\begin{aligned}
 u_{rk} &= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \gamma_{\kappa} [A_{1kn} J'_n(\gamma_{1\kappa} r) + A_{2kn} Y'_n(\gamma_{1\kappa} r)] + \frac{n}{r} [A_{3kn} J_n(\gamma_{2\kappa} r) + \right. \\
 &+ A_{4kn} Y_n(\gamma_{2\kappa} r)] - \frac{r\gamma_{2\kappa}}{\mu_{2\kappa}} [A_{5kn} J'_n(\gamma_{2\kappa} r) + A_{6kn} Y'_n(\gamma_{2\kappa} r)] \left. \right\} e^{i(\frac{\omega \cos \theta_k}{C_{Pk}} z - \omega t)}; \\
 u_{\phi k} &= - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n}{r} \left\{ \gamma_{\kappa} [A_{1kn} J_n(\gamma_{1\kappa} r) + A_{2kn} Y_n(\gamma_{1\kappa} r)] + \frac{r\gamma_{2\kappa}}{n} [A_{3kn} J'_n(\gamma_{2\kappa} r) + \right. \\
 &+ A_{4kn} Y'_n(\gamma_{2\kappa} r)] - \frac{r}{\mu_{2k}} [A_{5kn} J_n(\gamma_{2k} r) + A_{6kn} Y_k(\gamma_{2k} r)] \left. \right\} e^{i(\frac{\omega \cos \theta_k}{C_{Pk}} z - \omega t)}; \\
 u_{zk} &= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \gamma_k [A_{1kn} J_n(\gamma_{1k} r) + A_{2kn} Y_n(\gamma_{1k} r)] + \right. \\
 &\left. \frac{\gamma_{2k}^2}{n} [A_{5kn} J_n(\gamma_{2k} r) + A_{6kn} Y_n(\gamma_{2k} r)] \right\} e^{i(\frac{\omega \cos \theta_k}{C_{Pk}} z - \omega t)}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

здесь

$$\begin{aligned}
 \gamma_{1k}^2 &= \bar{\mu}_{1k}^2 - \gamma^2; \quad \bar{\mu}_{1k} = \frac{\omega}{a_{1k} \Gamma_k}; \quad \gamma_{2k}^2 = \bar{\mu}_{2k}^2 - \gamma^2; \\
 \bar{\mu}_{2k} &= \omega / c_{sk} \Gamma_{2k}; \quad c_{sk}^2 = \frac{\bar{\mu}_k}{\rho_k}; \quad \gamma = m\pi / l, \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (k = 1, 2, 3).
 \end{aligned}$$

Для нахождения произвольных постоянных  $A_{1kn}, A_{2kn}, A_{3kn}, A_{4kn}, A_{5kn}, A_{6kn}$  используем граничные условия (2)–(5). Тогда мы получаем  $6k + 3$  уравнений с  $6k + 3$  неизвестными. Система неоднородных уравнений решается методом Гаусса.

Изменение фазовой скорости, соответствующей первой частоте, в зависимости от длины волны представлено на рис. 3.



**Рис. 3. Изменение длины волны фазовой скорости, соответствующей первой частоте.**

$$4(1-\xi_1^2) \left[ \frac{1}{\beta a} + \Psi_{H_{01}}(\bar{\beta}a) \right] - 2(1-\xi_1^2)(1-\xi_2^2)^{1/2} \left[ \frac{1}{\bar{\alpha}a} + \Psi_{H_{01}}(\bar{\alpha}a) \right] + b \frac{\xi_1^2(2-\xi_1^2)}{(1-\xi_2^2)^{1/2}} \Psi_{H_{01}}(\bar{\alpha}a) = 0 .$$

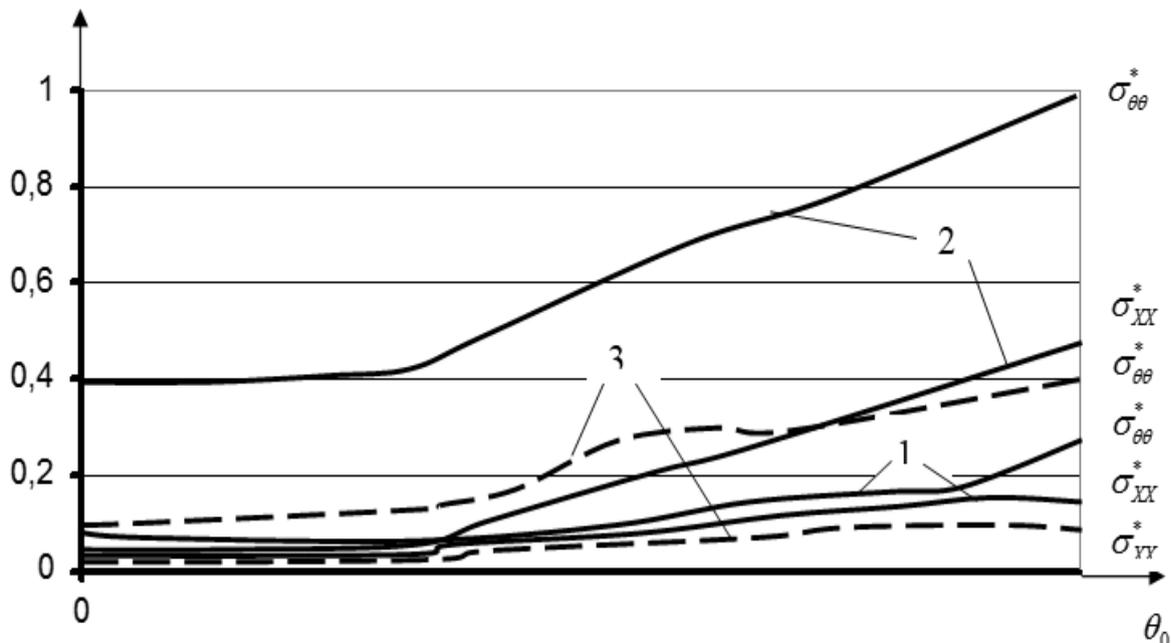
Здесь имеем:  $\Psi_{H_{01}}(\alpha) = H_0^{(1)}(\alpha) / H_1^{(1)}(\alpha) = -iK_0(|\alpha|) / K_1(|\alpha|) = -i\Psi_K(|\alpha|)$ ,  $\Psi_K(y) = K_0(y) / K_1(y)$ . В качестве ядра релаксации вязкоупругого материала принято ядро Ржаницына-Колтунова с трехпараметрической слабой особенностью:  $R_{\lambda,\mu\kappa}(t) = A_{\lambda,\mu\kappa} e^{-\beta_{\lambda,\mu\kappa} t} / t^{1-\alpha_{\lambda,\mu\kappa}}$ , где  $A, \alpha, \beta$  – параметры материала. Все результаты получены для параметров среды и цилиндрического тела:

- стальная оболочка в камне:  $\rho^* = 3,0, \tau = 0,25, \nu = 0.25\mu = 0,3$  (группа 1);
- бетонная оболочка в твердом грунте:  $\rho^* = 0,84, \tau = 0.25, M = 0.45, \nu = 0.2$  (2 группа);
- бетонная оболочка в мягком грунте:  $\rho^* = 0,84, \tau = 0.45, M = 0.4, \nu = 0.2$ . (группа 3).

В данной работе  $0,01 < M < 1, M = h/R, A = 0,048; \beta = 0,05; \alpha = 0,1$

Здесь также принято:  $0,01 < M < 1, M = h/R, A = 0,048; \beta = 0,05; \alpha = 0,1$ .

Численные результаты представлены на рисунке 4. Как видно из результатов, значения составляющих напряжений в оболочке зависят от физико-механических параметров среды и угла падения волны. Оказывается, максимальное напряжение на внутренней поверхности цилиндрического тела - это контурное напряжение.



**Рис. 4. Изменение составляющих напряжения в зависимости от угла падения волны: 1 и 2 — для параметров первой и второй групп; 3 — третья группа параметров**

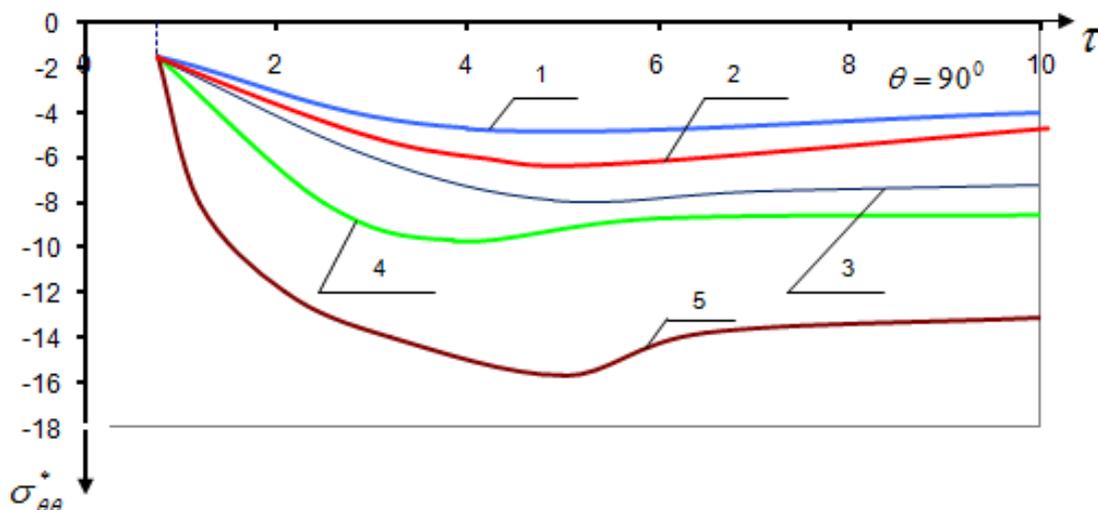
Установлено, что контурные напряжения под действием поперечной волны на 15-20% больше, чем контурные напряжения под действием продольной волны. Задача, поставленная при нестационарном волновом нагружении, состоит в том, что при применении преобразований Фурье (13) и (14) обратные преобразования осуществляются численным методом Ромберга. Контурные напряжения при радиальном  $\sigma_{rr} = \sigma_0 H(t) \cos nt$  и касательном  $\sigma_{r\theta} = \tau_0 H(t) \sin \theta$  напряжениях равны:

$$\sigma_{\theta\theta n}^* = \frac{\sigma_{\theta\theta n}(r_{01}, \theta, t)}{\sigma} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta_1(r_0 \Omega) e^{i\Omega t}}{\Omega_1 [\Delta_2 \Delta_3 + \Delta_4 \Delta_5]} d\Omega, \quad (16)$$

$$\Delta_1(r_{01} \Omega) = (\Delta_3 + \tau_0 E) [2\Omega H_{n-1}^{(1)}(\Omega) - ((2n^2 + 2n) + \Omega^2) H_n^{(1)}(\Omega)] +$$

$$+ [\tau_0 \Delta_2 - \Delta_4] \left[ 2n(n+1) H_n^{(1)} \left( \left( \frac{C_{P1}}{C_{S1}} \right) \Omega \right) + \frac{2C_P n \Omega}{C_{S1}} H_{n-1}^{(1)} \left( \left( \frac{C_P}{C_S} \right) \Omega \right) \right].$$

В частности, поскольку при  $\alpha > \omega$ , функция  $q_r^{FF}(\theta, \alpha, \omega)$  экспоненциально стремится к нулю, верхнее предельное значение заменяется конечным числом. При приложении нормальной волны к стальной оболочке, находящейся в вязкоупругой среде, мы наблюдаем изменение контурных напряжений в оболочке во времени. Изменение контурного напряжения во времени представлено на рис.5.



**Рис. 5. Изменение контурных напряжений во времени: 1-гранит-бетон-сталь; 2-песок-бетон-сталь; 3-мягкий грунт-бетон-сталь; 4-бетон-мягкий грунт-сталь; 5-кум- мягкий грунтобетон.**

Установлено, что полученные результаты в цилиндрическом слое, расположенном в упругой среде при  $n=0,1$  под действием неустановившегося волнового нагружения, отличаются от имеющихся результатов на 30%, а максимальное контурное напряжение наблюдается при  $\theta = 90$ .

В четвертой главе диссертации “Собственные колебания многослойного (цилиндрического и сферического) тела в вязкоупругой среде” исследуется вопрос о собственных колебаниях цилиндрических и сферических тел. Частотное

уравнение собственных колебаний цилиндрической полости, находящейся в вязкоупругой среде, имеет вид:

$$D_\rho = xH_{\rho-1}[(\rho^2 - 1)yH_{\rho-1}(y) - (\rho^3 - \rho + y^2/2)H_\rho(y)] - H_\rho(x)[(\rho^3 - \rho + y^2/2)yH_{\rho-1}(y) - (\rho^2 + \rho - y^2/4)y^2H_\rho(y)] = 0, \quad (17)$$

где  $x = \omega a(\rho/(\lambda + 2\mu))^{1/2}$ ;  $y = \omega a(\rho/\mu)^{1/2}$ ,  $\lambda$  и  $\mu$  - коэффициенты Ламе;  $\rho$  - плотность среды. Это уравнение решается численно, полученные результаты сравниваются с результатами Мао и ПАО и получаются удовлетворительные результаты (таблица 1).

Таблица 1. Результаты сравнения полученных результатов с результатами Мао и ПАО ( $\nu = 0,25$ )

№	Результаты автора	Рао и Мао	Барон и Мэтьюз
0	0,44741-0.44420 i	0.44647-0.44127 i	0.4464-0.4410 i
1	1,09272-0,77653 i	1.09272-0.7653 i	1.0929-0.441 i
2	1,907554-0,89782 i	1.90754-0.8978 i	1.9076-0.897 i
3	2,75652-0,99151	2.75652-0.9915 i	
4	3,63132-1,06662 i	3.63132-1.0666 i	
5	4.52440-1.13140 i	4.52440-1.1314 i	

Чтобы получить трансцендентное уравнение (частотное уравнение), представляющее сфероидные колебания, радиальная составляющая смещения ( $rot \vec{u}$ ) приравняется нулю. Тогда частотное уравнение, представляющее сфероидные колебания, получается в виде определителя следующим образом:

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{vmatrix} = 0. \quad (18)$$

Его элементы  $c_{ij}(i=1,2,3,4; j=1,2,3,4)$  представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} c_{11} &= n - G_i(z_p z_{sp} z_\omega), c_{12} = n(n+1), c_{13} = n - G_h(z_{sp} z_\omega), c_{14} = n(n+1), \\ c_{21} &= 1, c_{22} = n+1 - G_i(z_s z_\omega), c_{23} = 1, c_{24} = n+1 - G_h(z_\omega), \\ c_{31} &= n^2 - n - \frac{1}{2}(z_s z_\omega)^2 + 2G_i(z_p z_{sp} z_\omega), c_{32} = n(n+1)[n-1 - G_i(z_s z_\omega)], \\ c_{33} &= n^2 - n - \frac{1}{2}z_\omega^2 + 2G_h(z_{sp} z_\omega), c_{34} = n(n+1)[n-1 - G_h(z_\omega)], \\ c_{41} &= n-1 - G_i(z_p z_{sp} z_\omega) \quad c_{42} = n^2 - 1 - \frac{1}{2}(z_s z_\omega)^2 + G_i(z_s z_\omega), \\ c_{43} &= n-1 - G_h(z_{sp} z_\omega), \quad c_{44} = n^2 - 1 - \frac{1}{2}z_\omega^2 + G_h(z_\omega), \end{aligned}$$

где  $z_p = ((c_{p2}\sqrt{\Gamma_{pk2}})/(\sqrt{\Gamma_{pk1}c_{p1}}))$  - отношение скоростей продольных волн,  $z_{sp} = ((c_{s2}\sqrt{\Gamma_{sk2}})/(\sqrt{\Gamma_{pk2}c_{p2}}))$  - отношение скоростей поперечных волн. Когда в трансцендентном уравнении (14)  $z_\mu \rightarrow 0$ , рассматриваются сфероидальные колебания оболочки:

$$\begin{vmatrix} n^2 - n - \frac{1}{2}(z_\omega)^2 + 2G_i(z_{spi}z_\omega) & n(n+1)[n-1-G_i(z_\omega)] \\ n-1-G_i(z_{spi}z_\omega) & n^2 - n - \frac{1}{2}(z_\omega)^2 + 2G_i(z_\omega) \end{vmatrix} = 0.$$

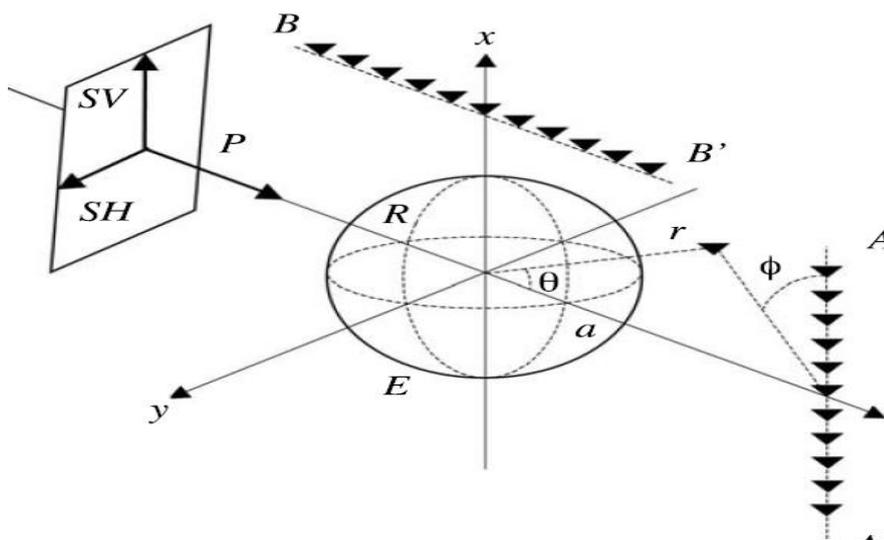
Здесь  $z_{spi} = ((c_{s2i}\sqrt{\Gamma_{sk2i}})/(\sqrt{\Gamma_{pk2i}c_{p2i}}))$ .

Если  $z_\mu \rightarrow \infty$ , то приходим к частотному уравнению (для сферического пространства в вязкоупругой среде):

$$\begin{vmatrix} n^2 - n - \frac{1}{2}(z_\omega)^2 + 2G_h(z_{sph}z_\omega) & n(n+1)[n-1-G_h(z_\omega)] \\ n-1-G_h(z_{sph}z_\omega) & n^2 - n - \frac{1}{2}(z_\omega)^2 + 2G_h(z_\omega) \end{vmatrix} = 0.$$

Корни этих уравнений находятся с помощью численного метода (Мюллера).

В пятой главе диссертации «Неустановившееся движение сферической оболочки в вязкоупругих средах» исследованы движение сферической оболочки под действием неустановившихся волн и динамическое напряженно-деформационное состояние (рис.6). Дифференциальное уравнение движения сферического тела и окружающей его среды выведен из уравнения Ламе в сферической системе координат.



**Рис. 6. Волновая нагрузка на сферическое тело**

На основе безмоментной теории выведены уравнения поставленной задачи. Тогда дифференциальное уравнение движения сферического тела следующее:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + ctg\theta \frac{\partial u}{\partial \theta} - (v_0 - ctg\theta)u - (1 + v_0) \frac{\partial w}{\partial \theta} - \\
& - \int_0^t R_u(t-\tau) L_{11}(u, w) d\tau = \frac{1}{c_{10}^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{1}{mc_{10}^2} p_1(a, \theta, t), \\
& (1 + v_0) \left( \frac{\partial u}{\partial \theta} + uctg\theta - 2w \right) - \int_0^t R_w(t-\tau) L_{22}(u, w) d\tau = \\
& = \frac{1}{c_{10}^2} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{1}{mc_{10}^2} p_2(a, \theta, t).
\end{aligned} \tag{19}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
L_{11}(u, w) &= \frac{\partial^2 u(\theta, \tau)}{\partial \theta^2} + ctg\theta \frac{\partial u(\theta, \tau)}{\partial \theta} - (v_0 - ctg\theta)u(\theta, \tau) - (1 + v_0) \frac{\partial w(\theta, \tau)}{\partial \theta} \\
L_{22}(u, w) &= (1 + v_0) \left( \frac{\partial u(\theta, \tau)}{\partial \theta} + u(\theta, \tau)ctg\theta - 2w(\theta, \tau) \right), \quad m = \rho_0 h, c_{10} = [E_0 / \rho_0 (1 - v_0^2)]^{1/2},
\end{aligned}$$

$E_0, v_0, \rho_0$  – соответственно мгновенный модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность сферического тела;  $R_u(t-\tau), R_w(t-\tau)$  – ядра релаксации;  $u, w$  – смещения срединной поверхности оболочки в направлении по касательной и нормали;  $\theta$  – угол.

Пусть вязкоупругая среда и сферическая оболочка находятся в состоянии осесимметричной деформации. Нагрузка, действующая на сферическую оболочку, имеет вид суммы падающих и отраженных волн:

$$p_k(a, \theta, t) = p_{kp}(a, \theta, t) + p_{ka}(a, \theta, t), \quad k = 1, 2,$$

где  $p_{kp}$  – нагрузка, создаваемая падающей волной,  $p_{ka}$  – нагрузка, создаваемая дифракцией волны. Полученная система дифференциальных уравнений приведена к системе интегро – дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned}
\ddot{u}_n + C_{10}^2 [n(n+1) - (1 - v_0)] u_n - C_{10}^2 (1 + v_0) - \int_0^t R_u(t-\tau) L_{11}^\square(u, w) d\tau &= P_{1n}, \\
\ddot{w}_n - C_{10}^2 (1 + v_0) [n(n+1) - 2w_n] u_n + \int_0^t R_w(t-\tau) L_{22}^\square(u, w) d\tau &= P_{2n}, \\
C_{\alpha 0}^2 \left[ \nabla^2 \Phi(r, t) - \int_0^t R_\alpha(t-\tau) \Phi(r, t) d\tau \right] &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \\
C_{\beta 0}^2 \left[ \nabla^2 \Psi(r, t) - \int_0^t R_\alpha(t-\tau) \Psi(r, t) d\tau \right] &= \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots
\end{aligned} \tag{20}$$

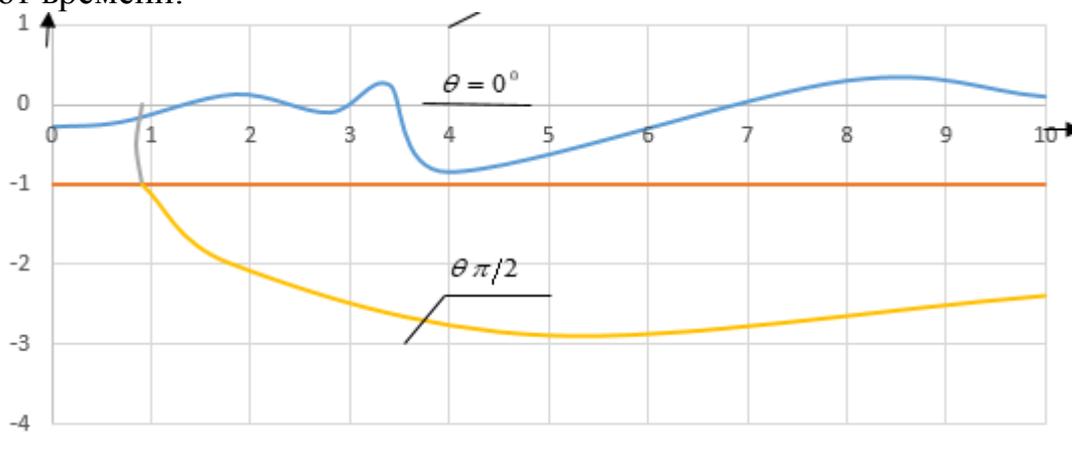
Падающая продольная волна как единичная функция была выбрана в виде

$$\varphi_p = 0.5(t + z - 1)H(t + z - 1), \psi_p = 0. \tag{21}$$

В момент времени  $t = 0$  падающая продольная волна встречается с оболочкой. Применяя преобразования Лапласа и используя свойства сферической функции, представим изображение в виде:

$$\varphi_p^L = \frac{e^{-s}}{s^2} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \sqrt{\frac{\pi}{2sr}} I_{n+1/2}(sr) P_n(\cos \theta).$$

Полученная система интегро - дифференциальных уравнений (21) была решена методом интегрального преобразования Лапласа. Обратное преобразование осуществляется через лемму Жордана. Численные результаты представлены на рис.7 в виде изменения контурного напряжения сферической оболочки от времени.



**Рис. 7. Изменение контурного напряжения оболочки с течением времени**

Таким образом, разработана математическая постановка, методика и алгоритм решения задач о воздействии неустановившегося нагружения на сферическую оболочку, находящуюся в вязкоупругой среде. При падении неустановившихся волн сферическая оболочка в начальный момент практически равномерно сжимается во всех направлениях, а затем наступает качественно новая фаза движения, при которой контурные напряжения затухают и появляются значительные напряжения изгиба. Из анализа численных результатов вытекает, что динамическое напряженно-деформированное состояние зависит от вида и характеристик, а также действия падающих значительных напряжений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Усовершенствована методики решения и алгоритмы исследования задач распространения и дифракции волн в сферических (или цилиндрических) многослойных конструкциях, погруженных в вязкоупругую среду. Разработанная теория позволяет осуществлять для расчётов сисместойкости пространственных подземных трубопроводов и тоннелей с учётом реалаческих свойств грунтов.

2. Разработаны методика и алгоритм исследования характерных колебаний тел, контактирующих с бесконечной средой. Предложена укороченные условия излучения волн Зоммерфельда на бесконечности. Предложенные укороченные условия излучения обеспечивают учет излучения волн на бесконечности.

3. Установлено, что рост модуля упругости среды имеет прямое увеличение значений комплексных собственных значений. Рост модуля упругости среды оказывает 10%-ное влияние на изменение значения коэффициента Пуассона.

4. Установлено, что увеличение толщины оболочки увеличивает действительную и мнимую части собственных значений. Увеличение толщины оболочки приведет к увеличению значение первой частоты на 20%, второй частоты - на 5-10%, а значение третьей частоты практически не изменяется.

5. Найдено, что контурные напряжения под действием поперечных волн на 15-20 % больше, чем контурные напряжения под действием продольных волн. Найденные результаты позволяют придти к выводу, что мягкий грунт, используемый для повышения прочности подземных сооружений, эффективен для воздействия в высокочастотном диапазоне.

6. Выявлено, что изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) в результате нестационарного волнового нагружения композитного цилиндрического тела с жидкостью в деформируемой среде. Выявленное изменение НДС позволило определить, что наибольшие напряжения достигаются в цилиндрическом слое при  $\theta = 90^\circ$  и  $\theta = 180^\circ$  под воздействием продольного нестационарного нагружения.

7. Определена разность при  $\theta = 90^\circ$  напряжений на внутренней и внешней поверхностях цилиндра, помещенного в упругую среду под действием поперечного волнового нагружения. Определенная разность при  $\theta = 90^\circ$  напряжений на внутренней и внешней поверхностях цилиндра равняется

разнице напряжений на срединной поверхности до 10% (при  $r_0/r_1 = 0,5$ ).

8. Получено аналитическое выражение дисперсионного соотношения фазовой скорости от частоты. Полученное аналитическое выражение дисперсионного соотношения позволяет определить волны Лэмба (трубную волну), которая при стремлении толщины стенки к нулю является единственно возможной.

**ONE-TIME SCIENTIFIC COUNCIL AT THE SCIENTIFIC COUNCIL  
AWARDING THE SCIENTIFIC DEGREES OF  
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 UNDER INSITUTE OF MECHANICS AND  
SIESMIC STABILITY OF STRUCTURES**

---

**TASHKENT CHEMICAL-TECHNOLOGICAL INSTITUTE**

**KULDASHOV NASIRDDIN URINOVICH**

**SCIENTIFIC BASICS OF DIFFRACTION AND WAVE PROPAGATION  
IN VISCOELASTIC BODIES OF SPHERICAL AND CYLINDRICAL  
FORMSCHARACTERISTICS OF LINEAR FREE AND FORCED  
VIBRATION OFA THREE-LAYER DISSIPATIVE INHOMOGENOUS  
CYLINDRICAL BODY**

**01.02.04 – Mechanics of a Deformable Rigid Bodies**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTORAL DISSERTATION (DSc) ON  
PHYSIC AND MATHEMATICS SCIENCES**

Tashkent- 2024

**The theme of the doctor of physical and mathematical sciences (DSc) dissertation was registered in the Higher Attestation Commission under the Ministry of higher education, science and innovation of the Republic of Uzbekistan under the number B2021.1.DSc/FM171**

---

The dissertation has been prepared at Tashkent of Chemical Technology Institute.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council (<https://instmech.academy.uz>) and on the information- educational portal "ZiyoNet" at the address ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).)

**Scientific adviser:**

**Safarov Ismoil Ibroximovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor

**Official Opponents:**

**Mardonov Botir Mardonovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor

**Mirzayev Ibrahim Karimovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor

**Yuldashev Sharofitdin Saifitdinovich**

Doctor of technical sciences, professor

**Lead organization:**

**National University of Uzbekistan**

The dissertation defense will take place “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024. at “\_\_\_” hours at a meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan at the address: Tashkent, street. Yahya Gulomova 70. Tel.: (+99871) 233-68-47; fax: (+99871) 233-74-82, e-mail: [konselyaria@academy.uz](mailto:konselyaria@academy.uz).

The dissertation can be found at the Information Resource Center of the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (registered under No. \_\_\_\_). (Address: 100047. Tashkent, street. Yahya Gulomova 70. Tel.: (+99871) 233-68-47; fax: (+99871) 233-74-82, e-mail: [konselyaria@academy.uz](mailto:konselyaria@academy.uz).)

The abstract of the dissertation was sent out “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024.

(Register Distribution Protocol No. “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024)

**M.M. Mirsaidov**

Chairman of the One-time scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences, doctor of technical sciences, professor, academician AS RUz.

**M.K. Usarov**

Scientific Secretary of the One-time scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences, doctor of physical and mathematical sciences, professor.

**R.A. Abirov**

Chairman of the seminar under the One-time scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences, doctor of Physical and mathematical sciences.

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

**Relevance and necessity of the dissertation topic.** In recent years, studies of the dynamic behavior of various composite materials such as shells in contact with a deformable medium have been an important progressive area of modern mechanics. There are many problems in such studies as dynamic stress-strain state, vibration and dynamic stability of structures made of composite materials associated with the environment. Studying these problems in the context of composite materials helps solve many problems in geophysics, seismic resistance of underground structures, mechanical engineering and other fields.

Therefore, the development of a unified methodology and calculation algorithm (wave fields containing various inhomogeneities) is an urgent task in the mechanics of a deformable solid.

In the world, special scientific research aimed at developing a unified computational methodology and algorithm for calculating multilayer structures with different viscous properties is of particular importance. In this regard, an important place is occupied by the assessment of the dynamic state of structures taking into account viscosity parameters. This condition makes it possible to develop methods for its determination only by understanding the essence of energy dissipation in a dynamic process for multilayer media. At the same time, one of the most important tasks is the identification and optimization of dissipative characteristics, as well as the study of dynamic stress-strain states of mechanical systems with long inhomogeneous structural layers.

Our republic is implementing comprehensive measures to increase the strength and efficiency of materials used in construction and mechanical engineering. The decree of the President of the Republic of Uzbekistan "On approval of the Concept for the development of science until 2030" "... dated October 29, 2020 defines tasks, including the widespread use of scientific and innovative potential, identification of priority areas for systematic reform of science in the future, training of highly qualified personnel, possessing modern knowledge and independent thinking..."<sup>2</sup>. Important in the implementation of these tasks is the development of a methodology for determining the characteristics of linear vibrations of a deformable spherical body in interaction with a viscoelastic medium.

This dissertation research to a certain extent serves to fulfill the tasks provided for by Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan No. UP-4947 dated February 7, 2017 "On the Strategy of Action for the further development of the Republic of Uzbekistan", No. UP-5066 dated June 1, 2017 "On measures to radically improve the efficiency of the emergency prevention and response system", No. PP-3190 dated August 9, 2017 "On measures to improve scientific research in the field of seismology, earthquake-resistant construction and seismic safety of the population and territory of the Republic of Uzbekistan" and the Presidential Resolution No. 3309 of October 14, 2017 "On improving the system of construction and operation of highways, bridges and other artificial structures", as well as other regulatory documents related to this activity. This

dissertation research can significantly contribute to the implementation of current tasks.

**Compliance of the research with the priority direction of science and technology development of the Republic of Uzbekistan.** This dissertation was carried out in accordance with the priority direction of the Republic of Science and Technology Development IV. «Development of information and information and communication technologies».

**The connection of the dissertation research with the research plans of the higher educational institution where the dissertation was completed.** The dissertation research was carried out within the framework of the scientific and technical program of the research plan "Scientific and practical problems of mathematics" conducted at the Tashkent Institute of Chemical Technology in 2015-2023.

The purpose of the research is to develop scientific bases for calculating wave propagation and diffraction in visco-elastic bodies (spherical and cylindrical shapes) and dynamic stability of fluid-flowing pipes and to improve calculation methods.

**Viscoelastic cylindrical and spherical bodies were taken as objects of the study.**

The subject of the research is the development of mathematical models and methods for solving the dynamics of dissipative (dissipative homogeneous or non-homogeneous) mechanical systems, taking into account various rheological properties of the material.

**Research methods.** The main differential integro-differential equations of the dissertation work are derived from the equations of the shell and viscoelastic theory. The freezing method, separation of variables, integral substitution (Fouré and Laplace), Muller, Gauss, Laplace and special functions of mathematical physics were used to solve these equations.

**Research hypotheses.** When studying the viscoelastic thin cylindrical shell as a three-dimensional problem, Kirchhoff-Liav and Timoshenko S.P. hypotheses were used. At the same time, the research issues and results fully satisfy the hypotheses of the mechanics of continuous media and deformable solids.

**The practical results of the research are as follows:**

- new results obtained for dissipative non-homogeneous mechanical systems (non-monotonic change of extinction coefficient or speed) serve to create new technologies and solve many practical problems in various fields;
- the results obtained for the field of stability of cylindrical bodies filled with liquid allow to solve practical problems in various fields of technology and make accurate calculations of engineering calculations related to the direction of wave propagation;
- the obtained results allow to reduce the state of stress and deformation of underground structures.

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

**Ўбўлим (I часть; I part)**

1. I.I. Safarov, Sh. B. Ochilov, N.U. Kuldashov, T.R. Ruziev Numerical Solution Of The Problem Of The Influence Of A Plane Nonstationary Elastic Wave On Cylindrical Bodies. Impact Factor 3.582 Case Studies Journal ISSN (2305-509X) – Volume 6, Issue 5 May-2017 <http://www.casestudiesjournal.com> -P.60-70.
2. Safarov I.I, Boltaev Z. I. Kuldashov N.U. Oscillations and Waves in a Layered Homogeneous Viscoelastic Medium. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology Volume 6, Issue 3, 2018, -P. 1-6.
3. Safarov I.I, Marasulov A.M., Kuldashov N.U. Vibrations of an Elastic half-space containing a pedagr ee with account of internal and wave dissipation of the oscillation energy. Internation journal of Engineering Research and echnology volume 6. Issue 9. 2018 -P.1-10.
4. M.Kh. Tshaev, I.I. Safarov, N.U. Kuldashov, M. R. Ishmamatov, T.R. Ruziev On the Distribution of Free Waves on the Surface of a Viscoelastic Cylindrical Cavity. Journal of Vibration Engineering & Technologies. Revised: 19 July 2019 pp. 5-11.
5. Safarov I.I, Kulmurov N.R, Teshayev M.Kh. Kuldashov N.U., Interaction of nonstationary waves on cylindrical body. Commons Attribution International License Applied Mathematics, 2019, 10, <http://www.scirp.org/journal/am> -C.435-447
6. Safarov I.I, Kulmurov N.R, Kuldashov N.U., Teshayev M.Kh Diffraction of Surface Harmonic Viscoelastic Waves on a Multilayer Cylinder with a Liquid. Commons Attribution International License Applied Mathematics, 2019, 10, <http://www.scirp.org/journal/am> -P. 468-484
7. Safarov I.I, Kulmurov N.R, Kuldashov N.U. Interaction of harmonic waves on a viscoelastic cylindrical shell. Advance Research Journal Of Multidisciplinary Discoveries. International Journal Foundation (MAY-2019) -P.1-10.
8. B. S. Rakhmanov, N. R. Kulmurov, Kuldashov N.U., M. R. Ishmamatov, Sh. F. Xalilov Natural experimental studies of the behavior of underground shell constructions under the influence of seismic explosion waves. Part 2. Method of experimental studies of dynamic behavior of underground pipeline designs under the influence of seismic explosion waves. International Scientific Journal Theoretical & Applied Science Year: 2019 Issue: 09 Philadelphia, USA -C. 68-76.
9. N. R. Kulmurov, M. R. Ishmamatov, B. S. Rakhmanov, N. B. Axmedov, Kuldashov N.U., Natural experimental research of the behavior of underground enclosed constructions exposed to seismic explosives. International

Scientific Journal Theoretical & Applied Science Year: 2019 Issue: 09 Philadelphia, USA .

**10.** N. R. Kulmurotov, M. R. Ishmamatov, N.U. Kuldashov , Numerical solution of the problem of the action of a plane unsteady elastic wave on cylindrical bodies. International Scientific Journal -Theoretical & Applied Science №11 2020 Philadelphia, USA -С. 352-360

**11.** Кулдашов Н.У., Чориев М., Пространственная задача взаимодействия (SV) поперечных - волн цилиндрической полости в упругой среде. O‘zbekiston Respublikasi Oliy Harbiy Aviatsiya Bilim Yurti (Havo Hujumidan Mudofaa Qo‘shinlari va Harbiy Havo Kuchlari Xabarnomasi Ilmiy - Axborot Jurnalı 1 (2) 2022 yil ) -С. 68-74.

**12.** N.U. Kuldashov, M. Choriev, U.A.Urolov Spatial problem of interaction p (longitudinal) - waves on a cylindrical cavity in an elastic. Science and innovation international scientific journal volume 2 issue 5 may 2023 UIF-2022: 8.2 | ISSN: 2181-3337 | SCIENTISTS.UZ. -P. 201-210

**13.** N.U. Kuldashov, B.Z. Nuriddinov, M. Choriev, A. Sh.Ruzimov, Sh. F. Xalilov Diffraction of Acoustic Harmonic Waves in a Viscoelastic Cylinder. International Journal of Engineering Trends and Technology Volume 71 Issue 8, 421-427, August 2023 ISSN: 2231-5381 /<https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I8P236> © 2023 Seventh Sense Research Group® .

#### **II бўлим (II часть; II part)**

**14.** Kuldashov N.U. On some properties of subsets of topological spaces of values of covariant functors. Zamonaviy topologiya tadbiqlari va muammolari nomli xalqaro konferensiya Toshkent. 20-24-may 2013. -B.55

**15.** Akhmedov M.Sh., Kuldashov N.U., Ruziyev T.R., Umarov A.O., Bending Vibrations Polymeric Pipes of Variable Section with Interference inside the Liquid. World wide Journal of multidisciplinary research and development. UGC 4(2) -P.72-74

**16.** Safarov I.I., Almuratov Sh.N., Esanov N.K., Kuldashov N.U., Diffraction of harmonic viscoelastic waves on cylindrical bodies. Proceedings of Online International Conference on Technological Developments in Systematic Research Organized by Novateur Publications, Pune, Maharashtra, India (ICTDSR-2020) -P.66-71.

**17.** A Ruzimov, M. Kh. Teshayev, Kuldashov N.U., Sh. N. Almuratov, D. G. Rayimov Active dynamic damping of vibrations of a mechanical system with a finite number of degrees of freedom. First International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials Journal of Physics: Conference Series (2020) -P.1-8.

**18.** N.U. Kuldashov, Sh. N. Almuratov, D. G. Rayimov, F. F. Homidov, F. B. Jalolov Transverse Forced Vibrations of the Plates, the Dissipative Properties of Which are Described Memory Functions. Journal of Physics: Conference Series 1921 (2021) -P.1-6.

**19.** Кулдашов Н.У., Чориев М. Пространственная задача

взаимодействие сейсмических волн на цилиндрическую оболочку находящемся в упругой среде . Toshkent Kimyo-Tehnologiya Instituti mexanika va matematikaning amaliy muammolari Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi 26-28 may 2022 yil -P. 317-320.

**20.** N.U. Kuldashov , A. M. Marasulov, G. G. Yunusov, A. Sh. Ruzimov ,T. S. Hojiev Stationary stress-strain state of a three-layer viscoelastic cylindrical shell under normal loading. ICMSIT-III-2022 Journal of Physics: Conference Series 2373 (2022) 022039 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2373/2/022039

**21.** N. R. Kulmurotov, N.U. Kuldashov , M. R. Ishmamatov, B. S. Rakhmanov, N. B. Axmedov Natural experimental research of the behavior of underground enclosed constructions exposed to seismic explosives. Part1. Method of experimental studies of dynamic behavior of underground pipeline designs under the influence of seismic explosion waves. International Scientific Journal Theoretical & Applied Science Year: 2019 Issue: 09 Philadelphia, USA -P..1-6

**22.** Кулдашов Н.У., Чориев М., Алмуратов Ш.Н. О собственных колебаниях прямолинейного участка газопровода при подводной прокладке. «Kimyo, neft-gazni qayta ishlash hamda oziq-ovqat sanoatlarini rivojlanishida innovatsion texnologiyalarni dolzarb muammolari» Respublika ilmiy-texnikaviy anjumani. Toshkent, 25-noyabr, 2022 y. -С. 157-159

**23.** Ахмедов , Н.У. Кулдашов , Ў. Жўраев, Н.К. Эсанов, Численное решение задачи о воздействии плоской нестационарной упругой волны на цилиндрические тела . Современные проблемы прикладной математики, информатики и механики сборник трудов международной научной конференции, Нальчик - 2023г -С.183-186.