

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

**MIRZO ULUG‘BEK NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
ARXITEKTURA QURILISH UNIVERSITETI**

AXATOV XUDAYNAZAR NORIM O‘G‘LI

**DOIRAVIY SILINDRIK QATLAMLI STRUKTURALARNING
QOVUSHOQ SUYUQLIK BILAN O‘ZARO NOSTATSIONAR
TA’SIRLASHUVI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

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

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

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

Axatov Xudaynazar Norim o'g'li

Doiraviy silindrik qatlamli strukturalarning qovushoq suyuqlik bilan o'zaro
nostatsionar ta'sirlashuvi..... 3

Ахатов Худайназар Норим угли

Нестационарное взаимодействие круговых цилиндрических слоистых
структур с вязкой жидкостью..... 23

Akhatov Khudaynazar Norim o'g'li

Unsteady interaction of circular cylindrical layered structures with viscous
liquid..... 43

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 46

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

**MIRZO ULUG‘BEK NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
ARXITEKTURA QURILISH UNIVERSITETI**

AXATOV XUDAYNAZAR NORIM O‘G‘LI

**DOIRAVIY SILINDRIK QATLAMLI STRUKTURALARNING
QOVUSHOQ SUYUQLIK BILAN O‘ZARO NOSTATSIONAR
TA’SIRLASHUVI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.2.PhD/FM1305 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Mirzo Ulug'bek nomidagi Samarqand davlat arxitektura-qurilish universitetida bajarilgan

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.bmti.uz) va «Ziyonet» Axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan

Ilmiy rahbar:

Yalg'ashev Burxon Fayzullayevich

fizika va matematika fanlari doktori (DSc), dotsent

Rasmiy opponentlar:

Safarov Ismoil Ibrohimovich

fizika va matematika fanlari doktori, professor

Yo'ldoshev Sharofiddin Sayfiddinovich

fizika va matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

“Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” milliy tatqiqotlar universiteti

Dissertatsiya himoyasi Buxoro davlat texnika universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 raqamli ilmiy kengashning 2025_ yil «28_»oktabr kuni soat 09³⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100118, Buxoro sh., Qayum Murtazoyev ko'chasi ,15-uy. Tel (99865) 223-78-84; faks: (99865) 223-79-72; e-mail: bmti_info@edu.uz.)

Dissertatsiya bilan Buxoro davlat texnika universiteti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (473 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100118, Buxoro sh., Qayum Murtazoyev ko'chasi ,15-uy. Tel (99865) 223-78-84).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «09»oktabr kuni tarqatildi.
(2025 yil «29» avgust_dagi 7 raqamli reestr bayonnomasi).



M.X. Teshayev

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

R.A. Sabirova

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

Z.I. Boltayev

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda qurilish va texnikaning har xil jabhalarida qo'llaniladigan muhandislik qurilmalarining ko'p qatlamli elementlari dinamikasini tadqiq etish, zamonaviy sonli usullarini qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida doiraviy ko'p qatlamli silindrik qobiqlar suv osti kemalari korpuslarida, suyuqlik yoki yoqilg'i haydash inshootlarida, havoda samolyotlarga yoqilg'i quyishda, burg'ilash jarayonlarida va turli texnik qurilmalarning og'irliklarini kamaytirgan holda mustahkamligini oshirish uchun konstruktiv elementlardan foydalanish va ularning dinamik xarakteristikalarini hisoblashning yangi usullarini amaliyotga joriy etishni taqozo etadi. Shu jihatdan qurilmalarning muhandislar va tadqiqotchilar oldiga qo'yayotgan zamonaviy talablari doirasida konstruksiyalarning og'irliklarini kamaytirish orqali qurilishda ularning mustahkamligi va ustuvorligini ta'minlashda foydanish o'ta muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda qatlamli konstruksiyalarning tarkibiy qismlarini nostatsionar tebranishlari, jumladan, turli tashqi nostatsionar dinamik yuk ta'siridagi doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqlarning dinamikasini tadqiq etishga yo'naltirilgan ilmiy-amaliy tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada muhandislik qurilmalarining mustahkamligini ta'minlash bilan bog'liq masalalarda, xususan, dinamik yuklar ta'siri ostidagi uch qatlamli qobiq elementlarini hisoblash masalalarida mavjud matematik modellar va hisoblash usullarini takomillashtirish va yangilarini yaratishga alohida e'tibor berilgan. Turli xildagi tebranishlar jarayonlarining matematik modellarini yaratish, aerokosmik, yer usti, yer osti va boshqa muhandislik konstruksiyalari elementlarining kuchlanganlik deformatsiyalanganlik holatlarini yuqori aniqlikda topish hamda sonli tadqiq qilish deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi sohasida yangi ilmiy izlanishlar olib borishga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda texnika va qurilishning turli sohalarida har xil tabiatli dinamik yuklar ta'siri ostidagi yuk tashuvchi va ko'taruvchi muhandislik qurilmalari deformatsiyasini hisoblash matematik modelini yaratish va amaliyotga keng tadbqiq etish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. Keyingi yillarda mamlakatni har tomonlama rivojlantirish bo'yicha, jumladan, O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirishning Harakatlar strategiyasida, xususan, «... ishlab chiqarishni modernizatsiya qilish, texnik va texnologik jihatdan yangilash, ishlab chiqarish, tejamkor va samarali zamonaviy texnologiyalarni bosqichma-bosqich joriy etish ...»¹ bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, qurilmalarning yuk ko'tarish qobiliyatlarini, jumladan uch qatlamli qovushoq-elastik qobiqlar yordamida amalga oshirish maqsadida qurilmalar

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 7 fevraldagi PF-4947-son "O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha harakatlar strategiyasi to'g'risida" gi Farmoni.

elementlarining deformatsiyalanish jarayonlarini ifodalovchi takomillashtirilgan matematik modellarni ishlab chiqish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017 yil 7 fevraldagi PF-4947-son “O‘zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo‘yicha Harakatlar strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni, 2017-yil 9-avgustdagi PQ-3190-son “O‘zbekiston Respublikasi hududi va aholisining seysmik xavfsizligi, seysmik chidamli qurilish va seysmologiya sohasida ilmiy tadqiqotlar o‘tkazishni yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi, 2018-yil 27-apreldagi PQ-3682-son “Innovatsion g‘oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliy joriy qilish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”, 2018-yil 2-fevraldagi PQ-3502-son “2018-2022 yillarda aholi punktlarini bosh rejalar bilan ta‘minlash, loyiha tashkilotlari faoliyatini yaxshilash, shuningdek, shaharsozlik sohasida mutaxassislar tayyorlash sifatini oshirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarorlari hamda mazkur faoliyat sohasiga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.

Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning IV «Matematika, mexanika va informatika» sohasidagi ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Qobiqlarning dinamikasini o‘rganish Kirxgoff-Lyav gipotezalariga asoslangan klassik nazariya asosida bajariladi. Ammo klassik nazariya qobiqning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holati komponentalarini to‘liq hisoblash imkonini bermaydi. Shuning uchun bu nazariyani rivojlantirish ustida juda ko‘p olimlar ish olib borgan va bu ishlar bugungi kunda ham davom etmoqda. Doiraviy silindrik qatlamli strukturalarning qovushoq suyuqliklar bilan o‘zaro ta’sirlashuvi jarayonlarining matematik modelini yaratish va takomillashtirishda ko‘plab xorijiy olimlar I.G.Filippov, X.Altenbax, E.I.Grigolyuk, S.H.Arshad, M.N.Naim, Abassi, X.Yajuan, F.Pellicano, P.B.Gonsalves, A.S.Sayyod, Y.M.Ghugal, J.N.Reddi, S.G.Pshenichnov, S.V.Ivanov, L.I.Mogilevich, S.B.Filippov, V.V.Gaidaichuk, K.E.Kotenko, H.A.Shahid, N.N.Muhammad, A.C.Чепурненко, A.N.Guz, B.B.Firsanov va boshqalarning hissalari kattadir.

Shu jumladan bir qator o‘zbek olimlari X.A.Raxmatulin, M.T.O‘razboev, T.R.Rashidov, Ya.N.Muborakov, T.Sh.Shirinkulov, M.Mirsaidov, I.K. Mirzayev, R.I.Xalmuradov, X.X.Xudoynazarov, K.S.Sultonov, K.Ismayilov, M.K.O‘sarov, A.B.Axmedov, B.Mardonov, T.Mavlonov, R.A.Abdukarimov, I.S.Safarov, Sh.Burqutboyev, M.X.Teshayev, Sh.S. Yuldashev, Z.I. Boltayev, B.F.Yalg‘ashev va boshqa bir qator o‘zbek olimlari bu borada salmoqli natijalarga erishganlar.

Qobiqlarning dinamikasi yoki boshqacha aytganda tebranishlarni o‘rganuvchi takomillashtirilgan nazariyalarini yaratish bo‘yicha tadqiqotlar, asosan ikki katta yo‘nalishga ega. Bulardan birinchisi asimptotik nazariya hamda Timoshenko va

Reyssner tipidagi nazariyalarni ishlab chiqish bo'lsa, ikkinchisi keyingi bir necha o'n yilliklarda elastiklik nazariyasi uch o'lchovli masalasining aniq yechimlaridan foydalanishga asoslangan qobiq tebranishlari nazariyalarini yaratishdan iborat. Ko'rsatilgan metod bo'yicha professorlar G.I.Petrashen va I.G.Filippovlar hamda ularning bir qator o'quvchilari tomonidan bir jinsli (bir qatlamli), qatlamli elastik va qovushoq-elastik qobiqlarning tebranishlari nazariyalari taklif etilgan. Nazariyalarni ishlab chiqishda, qator mutaxassislar fikriga ko'ra bir qancha muammolarga duch kelingan, xususan:

chegaraviy shartlar qobiq ichki qatlamlaridan birining o'rta sirti nuqtalari ko'chishlarining bosh qismlariga nisbatan shakllantirilgan. Bunday yondashuv ba'zi noaniqliklarga olib keladi, chunki tashqi yuklar qobiqning tashqi sirtlariga qo'yilgan bo'ladi;

noma'lum izlanuvchilar sifatida qobiq ichki qatlamlaridan birining o'rta sirti nuqtalari ko'chishlarining bosh qismlari qabul qilinadi (uch qatlamli qobiq holida o'rta sirt sifatida to'ldiruvchi qatlamning o'rta sirti olinadi). Ushbu bosh qismlar soni ko'chishlar soniga proporsional bo'lib umumiy holda oltitadan oshmasligi kerak. Agar chegaraviy shartlar aniq shakllantirilsa, ya'ni ular qobiq tashqi sirtlari ko'chishlarining bosh qismlariga nisbatan yozilsa, noma'lumlar soni o'n ikkitani tashkil etadi. Bu esa o'z navbatida ularni aniqlash uchun qo'llaniladigan differensial yoki integro-differensial tenglamalar sonining oshishiga va ularni yechish bilan bog'liq qator matematik muammolarga olib keladi.

qo'llanilgan yondoshuvlar, faqatgina qabul qilingan o'rta sirtga nisbatan simmetrik strukturali qatlamli qobiqlarni tadqiq qilish imkonini beradi;

Bayon qilingan fikrlardan kelib chiqqan holda ta'kidlash mumkinki, bugungi kunda materialning qovushoq-elastiklik xossalarini hisobga olgan va turli tashqi dinamik yuklanishlar ta'siri ostidagi qatlamli elementlarning, xususan, uch qatlamli qovushoq-elastik qobiqlarning nostatsionar tebranishlari nazariyasi, tebranish va ustuvorlik masalalarini yechish usullari va algoritmlarini ishlab chiqishdagi muammolar yetarli darajada o'rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Mirzo Ulug'bek nomidagi Samarqand davlat arxitektura-qurilish universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining №18.04.00-6 raqamli "Qurilish konstruksiyalarini muhitning ta'sirini hisobga olgan holda bir jinsli bo'lmagan, chiziqlimas, elastik xususiyatli, dinamikasi, zilzilabardoshligi hamda ustivorligi masalalarini nazariy va amaliy tadqiq etish" (2000-2025) mavzusidagi tadqiqot ishlari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi. Doiraviy silindrik qatlamli strukturalarning qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvida nostatsionar, o'qqa nisbatan simmetrik tebranishlarini dinamik hisoblashning matematik modellarini ishlab chiqish; uch qatlamli qobiqlarning ixtiyoriy kesimidagi nuqtalarida ko'chish va kuchlanish maydonlarini aniqlash algoritmlarini yaratish; ishlab chiqilgan modellarni uch

qatlamli kompozit va bir jinsli silindrik qobiqlar tebranishlarining amaliy masalalarini yechish uchun qo'llashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

doiraviy silindrik qatlamli qovushoq elastik va elastik strukturalarning nostatsionar buralma tebranishlari tashqi dinamik yuklar ta'sirini hisobga oluvchi matematik modelini ishlab chiqish;

-uch qatlamli qovushoq elastik qobiq ixtiyoriy ko'ndalang kesimi nuqtalarining kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlash algoritmini yaratish;

dinamik yuklanishlar ta'siri ostidagi doiraviy silindrik qatlamli strukturalarning qovushoq suyuqlik bilan ta'sirida tebranishlari uchun yangi amaliy masalalar qo'yish va hisob usulini ishlab chiqish;

qatlamli strukturalarning qovushoq suyuqlik ta'sirida qovushoq elastik qatlamlarning geometrik, fizik va mexanik xarakteristikalarining ko'ndalang kesim ixtiyoriy nuqtasidagi kuchlanish tenzori, ko'chish vektori komponentalarining vaqtga bog'liq qonuniyatlarini tadqiq qilish.

Tadqiqotning ob'ekti sifatida qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik qatlamli strukturalar olingan.

Tadqiqotning predmeti o'zgaruvchi yuklanishlar ta'siri ostidagi doiraviy silindrik qovushoq elastik strukturalarning nostatsionar tebranishlarini o'rganish.

Tadqiqotning usullari tadqiqot usuli sifatida G.I.Petrashen – I.G.Filippovning tadqiqot jarayonida aksioma va gipotezalardan foydalanmasdan tenglamalarni chiqarish metodi, Fur'e va Laplasning integral almashtirish metodlari, shuningdek boshqa analitik va sonli hisoblash va tadqiqot usullari qo'llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

doiraviy silindrik qatlamli strukturalarning qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvini hisobga olgan holda buralma tebranishlari o'rganishda tashqi dinamik yuklar ta'sirini hisobga oluvchi matematik model yaratilgan;

doiraviy silindrik uch qatlamli silindrik qobiqning ishlab chiqilgan nostatsionar tebranishlari tenglamalaridan, xususiy hollarda bir jinsli qobiq va sterjenlar tebranishlari tenglamalariga kelishi isbotlangan;

doiraviy silindrik qatlamli strukturalarning ixtiyoriy ko'ndalang kesimi nuqtalarining kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini vaqtning istalgan momentida aniqlash imkonini beruvchi samarali usuli ishlab chiqilgan;

ichki qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi qatlamli qobiq tebranishlari uchun yangi amaliy masalalar qo'yilgan hamda tegishli mos chegaraviy shartlar asosida uch qatlamli qobiqning garmonik tebranishlari va dinamik yuklar tasiridagi majburiy tebranishlari haqidagi xususiy masalalarni yechish usullari yaratilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

tashqi dinamik yuklar ta'siridagi uch qatlamli qovushoq-elastik qobiqlarning buralma tebranishlarini tadqiq qilish matematik amaliy modeli va kuchlanganlik

deformatsiyalanganlik holatini bir qiymatli aniqlash imkonini beruvchi samarali usul taklif etilgan;

uch qatlamli elastik qobiq erkin tebranishlari chastotasiga bog'lik o'zgarish qonuniyatini o'rganish natijalari hamda qobiq chetlari turlicha mahkamlanganda uch qatlamli qobiqning nostatsionar buralma tebranishlari amaliy masalalari yechimlari taklif etilgan;

dinamik, xususan tashqi yuklar ta'siri ostidagi qatlamli strukturalarning ko'ndalang tebranishlarida, uning ixtiyoriy nuqtalarining kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini xarakterlovchi parametrlarning koordinata va vaqtdan bog'liq o'zgarishlari grafik ko'rinishda tasvirlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi Furrye-Laplas integral almashrirlarini qo'llash, darajali qatorlarga yoyish usullari va matematik yondoshuvlar asosida tebranish tenglamalarini keltirib chiqarilganligi, boshqa mualliflarning natijalari bilan, xususiyl holda, bir jinsli doiraviy silindrik qobiq uchun olingan natijalar bilan, tizimli tekshirish orqali isbotlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlari qonunini ifodalovchi tenglamalarini keltirib chiqarish va rivojlantirish; tashqi yuklar ta'siri ostidagi uch qatlamli elastik va qovushoq-elastik qobiqlarning simmetrik tebranishlari haqidagi yangi amaliy masalalarni yechish hamda ishlab chiqilgan usullarni chetlari turlicha mahkamlangan qobiqlar xususan uch, ikki qatlamli va bir jinsli qobiqlar uchun umumlashtirish imkoniyati bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati uch qatlamli elastik va qovushoq-elastik qobiqlarning tashqi dinamik yuklar ta'siri ostidagi simmetrik tebranishlari jarayonida kuchlanganlik deformatsiyalanganlik holatini talab etilgan aniqlik bilan topishga yo'naltirilgan analitik usul va sonli algoritmlarni amaliyotda qo'llash mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarning joriy qilinishi. Doiraviy silindrik qatlamli strukturalarning qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvi bo'yicha olingan natijalar asosida:

Qovushoq suyuqlikni o'z ichiga olgan kompozit uch qatlamli silindrik qobiq (quvur) nuqtalarida tashqi impulsli yuk tasirida yuzaga keladigan normal kuchlanishning kritik qiymatlarini hisoblash "*KARVON PLAST*" MChJda quvurli uzatgichlarning ixtiyoriy kesimidagi nuqtalarida chidamlilik chegarasini aniqlashda amaliyotga joriy qilindi va quyidagi natijalar olingan. (O'zbekiston Respublikasi "O'zsanoatqurilishmateriallari" Uyushmasining 2024 yil 3 - iyundagi 02/15-1330 - son ma'lumotnomasi). Natijada turli diametrli uch qatlamli quvurlarning optimal qalinligini, tashqi statik va dinamik yuklar va ichki suyuqlikning bosimini hisobga olib, quvur turli nuqtalari radial ko'chishlarini hisoblash yordamida trubaning qalinligi 0,1mm ga kamaytirish imkonini va yuk

ko'taruvchi qatlamlar uchun ishlatiladigan material 4–5% ga tejash imkoni yaratilganligi ishlanmada o'z aksini topgan;

Dinamik yuklar ta'siridagi yuqori bosimli suyuqlikni yetkazib berish uchun quvur uzatgichlarning eng katta kuchlanishlarni aniqlash orqali uch qatlamli quvurning kuch parametrlarini hisoblash «UniverProStile» MChJda joriy etilgan. (O'zbekiston Respublikasi "O'zsanoatqurilishmateriallari" Uyushmasining 2024 yil 3 - iyundagi 02/15-1330 - son ma'lumotnomasi). Natijada qovushoq siqiluvchi suyuqlikni o'z ichiga olgan kompazit uch qatlamli silindrik struktura nuqtalarida tashqi impulsli yuk ta'sirida yuzaga keladigan normal kuchlanishning kritik qiymatlarini aniqlash uning ixtiyoriy kesimidagi nuqtalariga mustahkamlik chegarasini aniqlash imkonini va olingan natijalar xarajatlarni normaga nisbatan 5–7% ga kamaytirish imkoni yaratilganligi ilmiy asoslangan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Tadqiqot mavzusi bo'yicha jami 15 ta ilmiy ish chop etilgan bo'lib, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 10 ta ilmiy maqola, jumladan, 5 tasi respublika, 5 tasi xorijiy nashr (*Scopus* bazasiga kirgan) larda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, uchta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 110 betni tashkil etadi.

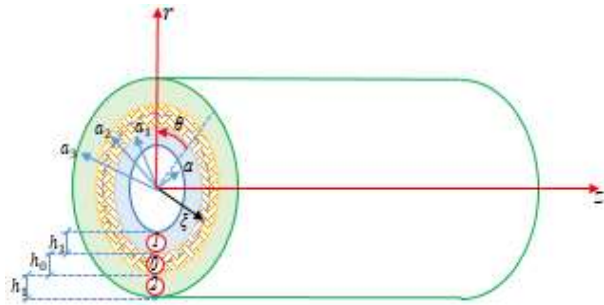
DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning respublika fan va texnikasini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi ko'rsatilgan, dissertatsiya mavzusi bo'yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi keltirilgan. Tadqiqot maqsadi, vazifalarni, obyekti va predmeti tavsiflangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalarini bayon qilingan, tadqiqot natijalarining ishonchliligi asoslangan, olingan natijalarning nazariy va amaliy ahamiyatini ochib berilgan; tadqiqot natijalarining amaliyotga tatbiq etilishi, dissertatsiya mavzusi bo'yicha nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi haqida ma'lumotlar berilgan.

Dissertatsiyaning "**Doiraviy silindrik qatlamli strukturalarning qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvi**" nomli birinchi bobi qovushoq suyuqliklar bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik strukturalarning buralma tebranishlari va muvozanat holatini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlarning umumiy sharhiga hamda suyuqlik va qovushoq-elastik jism uchun asosiy harakat tenglamalari, boshlang'ich va chegaraviy shartlarni tanlashga, qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik uch qatlamli silindrik qobiqning buralma tebranish tenglamalarini keltirib chiqarishga asoslangan.

Birinchi paragrafda dissertatsiya ishi mavzusi bo'yicha ilmiy maqolalarni o'rganish natijasida qatlamli strukturalar dinamikasi bo'yicha tadqiqotlarning umumiy sharhi yoritilgan.

Ikkinchi paragrafida dissertatsiya ishi doirasida tadqiq qilinadigan qovushoq suyuqlik va qatlamli strukturalar tebranishlari uch o'lchovli masalasining asosiy munosabatlari keltirilgan. Tadqiqot ishida qobiqni (r, θ, z) -silindrik koordinatalar



1-rasm. Uch qatlamli silindrik qobiq.

sistemasida qaraymiz. Bunda Oz -o'qi qobiqning simmetriya o'qi bo'ylab yo'nalgan (1-rasm). Qatlamlarni 1-rasmda ko'rsatilgan tartibda raqamlaymiz. Bu yerda a va a_1 lar qobiqning ichki va tashqi radiuslarini, a_2 va a_3 lar esa o'rta qatlamning ichki va tashqi radiuslarini bildiradi. Bundan keyin biz tashqi yuk ko'taruvchi qatlamni birinchi qatlam, ichki yuk ko'taruvchi qatlamni – ikkinchi, o'rta qatlamni esa nolinchi qatlam deb nomlaymiz.

Birinchi, nolinchi va ikkinchi qatlamlar qalinliklarini mos ravishda h_1, h_0 va h_2 lar orqali; qatlam materiallari elastiklik doimiylari, ya'ni Lamé koeffitsientlarini λ_s, μ_s lar orqali; qatlamlar materiallarining zichliklarini ρ_s lar orqali belgilaymiz. Shuningdek qatlamlar nuqtalarining koordinata o'qlari bo'ylab ko'chishlarini $u_s(r, \theta, z, t), v_s(r, \theta, z, t), w_s(r, \theta, z, t)$ lar orqali belgilaymiz.

Doiraviy silindrik qobiq qatlamlari nuqtalarida $\sigma_{ij}^{(s)}, \tau_{ij}^{(s)}$ ($i, j = 1, 2, 3; s = 0, 1, 2$) kuchlanishlar va $\varepsilon_{ii}^{(s)}, \gamma_{ij}^{(s)}$ deformatsiyalar komponentalari orasidagi bog'lanishlar qatlam materiallarining reologik xususiyatlarini hisobga olgan holda umumlashgan Guk qonuni quyidagi Bolsman integral munosabatlari ko'rinishidagi chiziqli operatorlar orqali ifodalanadi:

$$\sigma_{ii}^{(s)} = R_{\lambda s}(\varepsilon_{ii}^{(s)}) + 2R_{\mu s}(\varepsilon_{ii}^{(s)}); \tau_{ij}^{(s)} = R_{\mu s}(\gamma_{ij}^{(s)}); \quad (i, j = 1, 2, 3; i \neq j), \quad (1)$$

$$\varepsilon^{(s)} = \varepsilon_{rr}^{(s)} + \varepsilon_{\theta\theta}^{(s)} + \varepsilon_{zz}^{(s)}$$

Qatlamlar materiallarining qovushoq-elastiklik xossalari quyidagi integral operatorlar bilan hisobga olinadi:

$$R_{(\lambda, \mu)s}(\zeta) = (\lambda_s, \mu_s) \left[\zeta(t) - \int_0^t K_{(\lambda, \mu)s}(t - \tau) \zeta(\tau) d\tau \right], \quad (2)$$

bu yerda $\zeta(t)$ vaqtning ixtoriy funksiyasi, $K_{\lambda s}(\tau), K_{\mu s}(\tau) - R_{\lambda s}$ va $R_{\mu s}$ qovushoq-elastik operatorlarning qatlamlar materiallari xossalari bog'liq bo'lgan yadrolari. Bunda $R_{\lambda s}$ va $R_{\mu s}$ -qaytarish operatorlar, $K_{\lambda s}(\xi)$ va $K_{\mu s}(\xi)$ yadrolar esa – ixtoriy. Ammo aniq masalalar yechishda eksponensial funksiya hisobga olinadi.

Hajmiy kuchlarni hisobga olmaganda doiraviy silindrik qatlam nuqtalarining harakat tenglamalari ko‘rinishda olinadi.

$$\sigma_{ij,j} = \rho_s \frac{\partial U_i}{\partial t^2}; (i, j = r, \theta, z) \quad (3)$$

bu yerda U_i - qatlam nuqtalarining ko‘chish vektorlari; t - vaqt.

Qobiq nuqtalarining harakat tenglamalari qatlamlar ko‘chish $\vec{U}^{(s)}$ vektorlarini skalyar φ_s va vektor $\vec{\psi}_s$ potentsiallar orqali ifodalab quyidagi integro-differensial tenglamalarga keltirilgan

$$R_s(\Delta\varphi^{(s)}) = \rho_s \ddot{\varphi}_s; R_{\mu s}(\Delta\vec{\phi}_s) = \rho_s \ddot{\vec{\phi}}_s; \quad (s=0,1,2) \quad (4)$$

Kiritilgan skalyar va vektor potentsiallar orqali ko‘chish vektorlari, kuchlanish va deformatsiya tenzorlarining hamma komponentalari ifodalangan formulalar olingan.

Qovushoq siqiluvchan suyuqlik zarrachalari tebranishlarini kichik deb hisoblaymiz. Bunda ichki suyuqlikni siqiluvchan suyuqlik deb qaraymiz U holda suyuqlikning chiziqli tebranishlar nazariyasidan qovushoq suyuqlikning Nav’e-Stoks harakat tenglamalaridan foydalanamiz:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} - \nu' \Delta \vec{V} + \frac{1}{\rho'_0} \text{grad} p + \frac{1}{3} \nu' \text{grad} \text{div} \vec{V} = 0, \quad (5)$$

bu yerda $\vec{V}$ - suyuqlik ixtiyoriy zarrachasi tezlik vektori, ρ'_0 - tinch holatdagi suyuqlik zichligi, ν' - kinematik qovushoqlik koeffitsiyenti, Δ - laplas operatori.

Suyuqlik uzviylik tenglamasi

$$\frac{1}{\rho'_0} \frac{d\rho'}{dt} + \text{div} \vec{v} = 0, \quad (6)$$

ρ' -qo‘zg‘algan suyuqlik zichligi, suyuqlik nuqtalarida kuchlanish tensorining komponentlari uchun Nave-Stoks qonuni formulalari

$$P_{ij} = -p\delta_{ij} - \frac{2\mu'}{3} \delta_{ij} \text{div} \vec{v} + \mu' e_{ij}, \quad (7)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (i, j = r, \theta, z)$$

bu yerda P_{ij} ($i, j = r, \theta, z$) - suyuqlikda kuchlanish tenzori komponentalari, δ_{ij} - Kroneker simvoli, p - qo‘zg‘atilgan suyuqlik bosimi, μ' - qovushoqlik koeffitsienti.

Suyuqlik uchun uzviylik tenglamasi, Nave Stoks tenglamasi va Nave Stoks qonunidan tashqari chiziqli holat tenglamasidan ham foydalanamiz

$$\frac{\partial p}{\partial \rho'} = a_0^2, \quad a_0 = \text{const}. \quad (8)$$

a_0 - tinch holatdagi suyuqlikda tovush tarqalish tezligi, $\mu' = \rho'_0 \nu'$ - qovushoqlik koeffitsiyenti.

Qovushoq suyuqlik harakati uchun skalyar G va vektor $\vec{\chi}$ potentsiallar kiritib qovushoq suyuqlik uchun quyidagi potentsiallar orqali tenglamalarga ega bo‘lamiz

$$\vec{V} = \frac{\partial}{\partial t}(\text{grad}G + \text{rot}\vec{\chi}), \quad (9)$$

bu yerda $\vec{\chi}$ vektor potentsial ushbu tenglamani qanoatlantirishi zarur

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \nu'\Delta\right)\vec{\chi} = 0.$$

Uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlari uchun chegaraviy shartlar quyidagi ko‘rinishga ega.

$$\sigma_{r\theta}^{(2)}(r, z, t) = F_{r\theta}^{(2)}(z, t) \quad (10)$$

bu yerda $F_{r\theta}^{(2)}(z, t)$ tashqi ta’sirlarning funksiyalari. Bundan tashqari, qatlamlar va suyuqlik zarrachalari orasidagi chegara sirtlarida kontakt shartlariga ko‘ra, ko‘chishlar va kuchlanishlarning tengligi shartlari bajarilishi kerak. Nolinchi, birinchi va ikkinchi qatlamlar va suyuqlik zarrachalari orasidagi kontakt shartlar quyidagicha

$$\begin{aligned} V_{\theta}^{(1)}(a, z, t) &= \frac{\partial}{\partial t} u_{\theta}^{(1)}(a, z, t), & -p_{r\theta}(a, z, t) &= \sigma_{r\theta}^{(1)}(a, z, t), \\ u_{\theta}^{(0)}(a_1, z, t) &= u_{\theta}^{(1)}(a_1, z, t), & \sigma_{r\theta}^{(0)}(a_1, z, t) &= \sigma_{r\theta}^{(1)}(a_1, z, t), \\ u_{\theta}^{(0)}(a_2, z, t) &= u_{\theta}^{(2)}(a_2, z, t), & \sigma_{r\theta}^{(0)}(a_2, z, t) &= \sigma_{r\theta}^{(2)}(a_2, z, t). \end{aligned} \quad (11)$$

Masalaning boshlang‘ich shartlari nolga teng

$$\psi_m(r, z, t) = \frac{\partial \psi_m(r, z, t)}{\partial t} = 0. \quad (12)$$

Birinchi bobning uchinchi paragrafida ichki qovushoq suyuqlik bilan ta’sirlashuvchi doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning buralma tebranish tenglamalarining matematik madeli keltirib chiqarilgan. Doiraviy silindrik qatlam va suyuqlik oqimlari uchun harakat tenglamalari hamda masalaning o‘qqa nisbatan simmetrikligiga ko‘ra buralma tebranayotgan jism uchun harakat tenglamalari quyidagi sistemadan iborat bo‘ladi

$$\begin{aligned} M_{\mu_1}(\Delta\psi_1) &= \frac{1}{b_1^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2}, & M_{\mu_0}(\Delta\psi_0) &= \frac{1}{b_0^2} \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial t^2}, \\ M_{\mu_2}(\Delta\psi_2) &= \frac{1}{b_2^2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial t^2}, & \left(\frac{\partial}{\partial t} - \nu'\Delta\right)\vec{\chi} &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Qobiq qatlamlari materiallarining buralma to‘lqin potentsial funksiyalarini quyidagi ko‘rinishda tasvirlaymiz.

$$\psi_s(r, z, t) = \int_0^{\infty} \frac{\sin kz}{-\cos kz} dk \int_{(I)} \bar{\psi} e_s^{qt} dq, \quad \chi(r, z, t) = \int_0^{\infty} \frac{\sin kz}{-\cos kz} dk \int_{(I)} \bar{\chi} e_s^{qt} dq, \quad (14)$$

So‘ngra, (13) harakat tenglamalariga (14) almashtirishlarni qo‘yib quyidagi Bessel tenglamalariga ega bo‘lamiz

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \alpha_s^2\right)\bar{\psi}_s = 0, \quad \left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \gamma^2\right)\bar{\chi} = 0, \quad (15)$$

bu yerda $\alpha_s^2 = \frac{q^2}{b_s^2} M_{\mu_s}^{-1} + k^2$, $\gamma^2 = \frac{q}{v'} + k^2$, $M_{\mu_s} = 1 - f(q)$, $f(q) = \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-qt} dt$.

Yuqoridagi (15) Bessel tenglamalarining chegaralanganlik shartlarini qanoatlantiruvchi umumiy yechimlari quyidagi ko'rinishga ega.

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_s(r) &= H_s^{(1)} J_0(\alpha_s r) + H_s^{(2)} Y_0(\beta_s r); \quad (s = 0, 1, 2), \\ \chi &= D_1 J_0(\gamma r) \end{aligned} \quad (16)$$

bu yerda $H_s^{(i)}(k, p)$, $D_1(k, p)$, $(s = 0, 1, 2, i = 1, 2)$, r - radial o'zgaruvchiga bog'liq bo'lmagan chegaraviy shartlardan aniqlanadigan integral o'zgaruvchilari, $J_0(r)$, $Y_0(r)$ - Besselning modifitsirlangan funktsiyalari.

Yuqorida keltirilgan (10), (11), (12) va (13) tenglamalar sistemasi birgalikda yechilib, qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlari tenglamasining matematik modeli olingan.

$$\begin{aligned} \left(M_{\mu_0}^{-1} \mu' \frac{a^2}{6} q \delta + \frac{a^2}{a_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - a_1^2}{12} \lambda_1 \right) \right) \left(\frac{a_1^2}{4} \lambda_0 u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} \lambda_0 - \frac{2}{a_1^2} \right) u_{\theta,1}^{(0)} \right) &= M_{\mu_0}^{-1} f_{r\theta}^{(1)}(k, q), \\ \frac{a_2^2}{a_3^2} \left(1 + \frac{a_2^2 - a_3^2}{4} \lambda_2 \right) \left(\frac{a_2^2}{4} \lambda_0 u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} \lambda_0 - \frac{2}{a_2^2} \right) u_{\theta,1}^{(0)} \right) &= M_{\mu_0}^{-1} f_{r\theta}^{(2)}(k, q). \end{aligned} \quad (17)$$

Dissertatsiyaning **“Doiraviy silindrik ikki qatlamli qobiqning qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvi”** deb nomlangan ikkinchi bobi doirasida, qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi ikki qatlamli qovushoq-elastik, simmetrik strukturali qobiqning buralma tebranishlari tenglamalari keltirib chiqarildi. Bunda chegaraviy shartlar qobiq tashqi sirtlari nuqtalaridagi kuchlanishlarga nisbatan shakllantirilgan va qovushoq-elastiklik nazariyasi aniq yechimlar usulidan foydalanilgan.

Bobning *birinchi paragrafi* doiraviy silindrik ikki qatlamli qobiqning qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvida buralma tebranish tenglamalarini keltirib chiqarishga bag'ishlangan. Silindrik qatlam va suyuqlik oqimlari uchun (13) harakat tenglamalaridan foydalanilgan. Qatlamlarning kontakt sirtida urinma kuchlanishlarga nisbatan ifodalangan quyidagi dinamik shartlar bajarilishi kerak

$$\sigma_{r\theta}^{(1)}(r, z, t) \Big|_{r=\theta_2} = F_{r\theta}^{(1)}(z, t). \quad (18)$$

Ma'lumki gidroelastiklik masalalari qattiq jism va qovushoq suyuqlikning kontakt sirtida dinamik va kinematik shartlar asosida qo'yiladi. Qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvi muhandislik konstruksiyalari elementlarining buralma tebranishlari haqidagi masalalarning matematik qo'yilishida ushbu sirtidagi urinma kuchlanishlar tengligi hisobga olinishi kerak va suyuqlik harakati uchun Nave-Stoks tenglamasidan foydalanish zarur. Suyuqlik zarrachalarining tezligi qatlam nuqtalarining tezliklari teng bo'lishi lozim. U holda qatlamlar uchun kinematik shartlar quyidagicha

$$\begin{cases} u_{\theta}^{(0)}(r, z, t)|_{r=a_1} = u_{\theta}^{(1)}(r, z, t)|_{r=a_1}; \\ \sigma_{r\theta}^{(1)}(r, z, t)|_{r=a_1} = \sigma_{r\theta}^{(0)}(r, z, t)|_{r=a_1} \end{cases} \quad (19)$$

Qatlam va suyuqlik uchun kinematik shartlar

$$\begin{cases} V_{\theta}(r, z, t)|_{r=a} = \frac{\partial}{\partial t} u_{\theta}(r, z, t)|_{r=a}; \\ \sigma_{r\theta}^{(0)}(r, z, t)|_{r=a} = -p_{r\theta}(r, z, t)|_{r=a} \end{cases} \quad (20)$$

bu yerda $\vec{V}_{\theta}$ -suyuqlik zarrachasining tezlik vektori, V_i ($i = r, \theta, z$)-uning komponentalari, p_{ij} ($i, j = r, \theta, z$) - suyuqlikda kuchlanish tenzori komponentalari

Boshlang'ich shartlar nolga teng

$$\psi_s(r, z, t) = \frac{\partial \psi_s(r, z, t)}{\partial t} = 0. \quad (21)$$

Yuqorida keltirilgan (15), (19), (20) va (21) tenglamalar sistemasi birgalikda yechilib, qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik ikki qatlamli qobiqning buralma tebranishlari tenglamasining matematik modeli olingan.

$$\begin{aligned} & \frac{a_1^2}{4a_2^2} \left[4 + h_1(2a_1 + h_1)\lambda_1 + \frac{a_1^2 h_1}{4}(2a_1 + h_1)\lambda_1^2 \right] \times \left[\frac{a_1^2}{4} \lambda_0 u_{\theta,0}^{(0)} + \right. \\ & \left. + \xi \left(\frac{1}{2}(\lambda_0 - \frac{4}{a_1^2}) + \frac{a_1^2}{8}(\ln \frac{a_1}{\xi} - \frac{1}{4})\lambda_0^2 \right) u_{\theta,1}^{(0)} \right] = \bar{M}_{\mu_1}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}(k, p)]; \\ & \left(\frac{a^2}{4} \lambda_0 - \frac{\mu' a^2}{6} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} q \delta_0 \right) u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2}(\lambda_0 - \frac{4}{a^2}) + \right. \\ & \left. + \frac{a^2}{8}(\ln \frac{a}{\xi} - \frac{1}{4})\lambda_0^2 - \frac{\mu'}{6} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} q \delta_0 - \frac{\mu' a^2}{12} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} \ln \frac{a}{\xi} q \delta_0 \lambda_0 \right) u_{\theta,1}^{(0)} = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

bu yerda h_1 -tashqi qatlamning qalinligi, μ' -dinamik qovushoqlik koefsiyenti, M_{μ_0} qovushoq-elastik operator, ξ - o'rta sirt radiusi,

Bobning *ikkinchi paragrafi* qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik ikki qatlamli qobiqning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlash masalasi hal qilingan. Bunda o'zgarmas tezliklar bilan oquvchi, ichki qovushoq siqiluvchi suyuqliklar oqimlarining ta'sirini hisobga olib, doiraviy silindrik ikki qatlamli qobiqlarning nostatsionar buralma tebranishlarida, uning ixtiyoriy kesimi nuqtalaridagi kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlash algoritmini yaratilgan. Ushbu algoritm o'z ichiga qaralayotgan gidroelastik sistemaning buralma tebranishlarida silindrik qatlam nuqtalarining faqat buralma ko'chishlari $u_{\theta}^{(i)}$, uning kesimlaridagi $\sigma_{r\theta}, \sigma_{z\theta}$ kuchlanish, hamda suyuqliklar oqimlari zarrachalari tezlik vektorlarining urinma V_{θ} komponentalari va qovushoq suyuqliklar nuqtalaridagi $p_{r\theta}$ va $p_{z\theta}$ kuchlanishlar noldan farqli bo'ladilar.

Bobning *uchinchi paragrafi* ichki qovushoq suyuqliklar bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik ikki qatlamli qovushoq elastik qobiqning garmonik buralma tebranishlari masalasi tadqiq qilingan. Buning uchun tebranishlar asosiy tenglamalari sifatida (22) tenglamalar sistemasi qabul qilingan.

Bu holda qovushoq-elastiklik (3) integral operatorining $f(t-\tau)$ yadrosi quyidagi regular ko'rinishda qabul qilingan

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\nu_n}{\tau_n} e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \nu_n = 1, \quad (23)$$

bu yerda ν_n – jismning qovushoqlik parametrlari; τ_n – relaksatsiya vaqtlari. Masalada sonli natijalarning qiymatlari olingan. Olingan natijalar tebranish chastotasining to'liq soniga bog'liq grafiklari keltirilgan.

Bobning to'rtinchi paragrafida ichki radiusi a , tashqi radiusi a_1 , uzunligi l ga teng bo'lgan ichki tomondan qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi silindrik qobiqni (r, θ, z) silindrik koordinatalar sistemasida qaraymiz. Qobiqning erkin uchiga $z=0$ amplitudasi $g(t)$ kabi berilgan kinematik zarba qo'yilgan. Qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik qobiqning ixtiyoriy kesimidagi kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holat parametrlari fazoviy z koordinata va t vaqtga bog'liq ravishda aniqlansin.

Asosiy tebranish tenglamasi sifatida birinchi paragrafda keltirib chiqarilgan (22) tenglamalar sistemasidagi $a_1 = a_2$ teng desak quyidagi tenglamalar sistemasiga ega bo'lamiz.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{a_1^2}{4} \lambda_0 u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} \left(\lambda_0 - \frac{4}{r_1^2} \right) + \frac{a_1^2}{8} \left(\ln \frac{a_1}{\xi} - \frac{1}{4} \right) \lambda_0^2 \right) u_{\theta,1}^{(0)} \right] = \bar{M}_{\mu_1}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}(k, p)] \\ & \left(\frac{a^2}{4} \lambda_0 - \frac{\mu' a^2}{6} \hat{M}_{\mu_0}^{-1} q \delta_0 \right) u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} \left(\lambda_0 - \frac{4}{a^2} \right) + \frac{a^2}{8} \left(\ln \frac{a}{\xi} - \frac{1}{4} \right) \lambda_0^2 - \right. \\ & \left. - \frac{\mu'}{6} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} q \delta_0 - \frac{\mu' a^2}{12} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} \ln \frac{a}{\xi} q \delta_0 \lambda_0 \right) u_{\theta,1}^{(0)} = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Yuqoridagi (24) tenglamalar sistemasida izlanuvchilar $u_{\theta,0}^{(0)}$ va $u_{\theta,1}^{(0)}$ bo'lganligi uchun, bu izlanuvchilar uchun $u_{\theta} = u_{\theta,1}^{(0)} + \xi u_{\theta,0}^{(0)}$ formulaga ko'ra boshlang'ich va chegaraviy shartlarni quyidagicha olamiz:

Chegaraviy shartlar

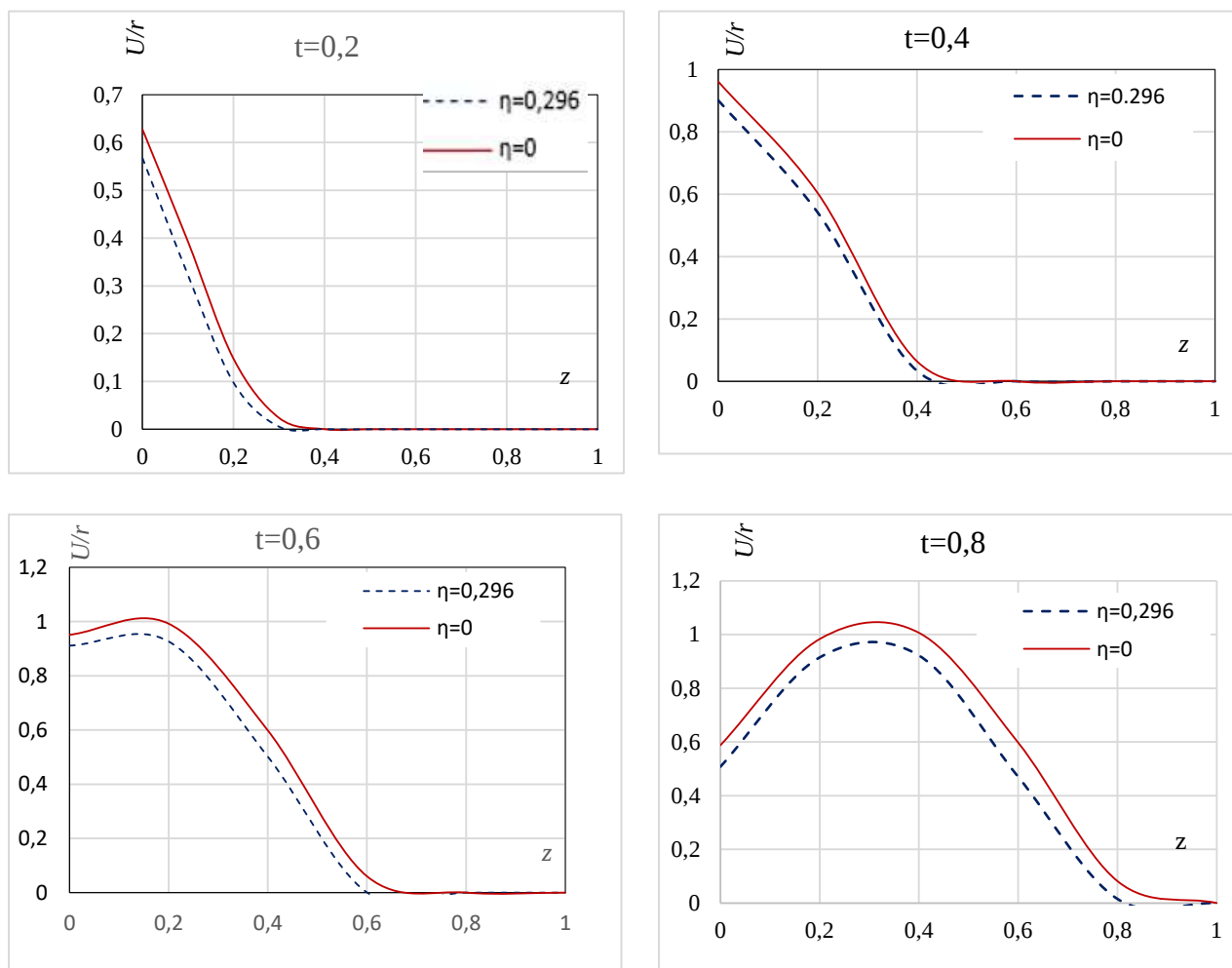
$$u_{\theta,0}^{(0)}(z, t) \Big|_{z=0} = \frac{A}{2\xi} \sin\left(\pi \frac{t}{t_1}\right); \quad u_{\theta,1}^{(0)}(z, t) \Big|_{z=0} = \frac{A}{2} \sin\left(\pi \frac{t}{t_1}\right); \quad (25)$$

$$u_{\theta,0}^{(0)}(z, t) \Big|_{z=l} = 0; \quad u_{\theta,1}^{(0)}(z, t) \Big|_{z=l} = 0. \quad (26)$$

Boshlang'ich shartlar

$$t = 0 \quad \text{da} \quad u_{\theta,0}^{(0)} = \frac{\partial u_{\theta,0}^{(0)}}{\partial t} = 0; \quad u_{\theta,1}^{(0)} = \frac{\partial u_{\theta,1}^{(0)}}{\partial t} = 0. \quad (27)$$

Qaralayotgan masala (24) tenglamaning (25), (26) va (27) shartlarni qanoqlantiruvchi sonli yechimlari Maple-17 dasturi matematik paketidan foydalangan holda ichki qovushoq suyuqlik oqimidagi doiraviy silindrik qobiqning buralma tebranishlarida buralma ko'chish hisobi bajarilgan. Olingan natijalar jadval va grafik ko'rinishida tasvirlangan.



2-rasm. $\eta = \rho'/\rho$ turli qiymatlarida qobiqning turli kesimlari ($t=0,2; 0,4; 0,6; 0,8$) nuqtalarning U_θ buralma ko'chishlarining koordinataga bog'liq o'zgarishlari grafiklari.

2-rasmda vaqtning $t = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ nuqtalarining qovushoq suyuqlik bo'lganda va suyuqlik bo'lmagan hollarda U_θ buralma ko'chishlarining koordinatadan bog'liq o'zgarishlari grafiklari tasvirlangan. Ko'rinib turibdiki, tashqi kuchning mavjudligi buralma ko'chish amplitudasining sezilarli darajada oshishiga olib keladi.

Dissertatsiyaning **“Doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvida amaliy masalalar”** deb nomlangan uchinchi bobi doirasida ichki qovushoq suyuqliklar ta'siri hisobga olinganda va olinmaganda uch qatlamli silindrik elastik va qovushoq elastik qobiqlarning garmonik buralma tebranishlari tadqiq etilgan va taqqoslash ishlari bajarilgan. Doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning faqat buralma (garmonik yoki

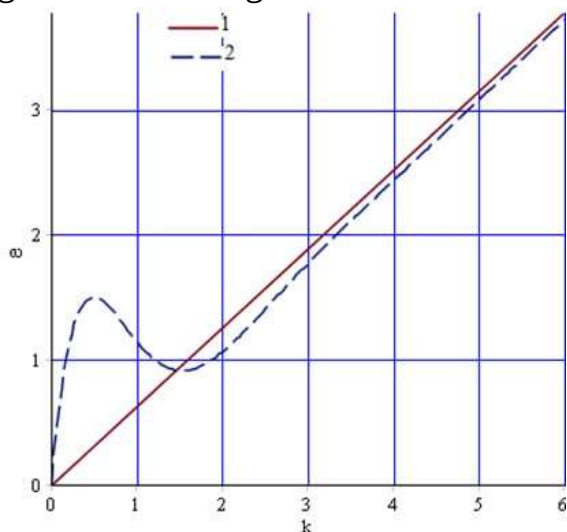
nostatsionar) tebranishlari masalalaridan tashqari ichki suyuqlik ta'sirlashuvida uch qatlamli qobiq nuqtalarining burovchi moment ta'sirida kuchlanganlik deformatsiyalanganlik holatini aniqlash masalalari hal qilingan va grafiklari qurilgan.

Bobning birinchi paragrafda ichki qovushoq suyuqliklar bilan ta'sirlashuvchi uch qatlamli silindrik qobiqning garmonik buralma tebranishlari masalasi tadqiq qilingan. Bu tebranishlarning asosiy tenglamalari sifatida birinchi bobning uchinchi paragrafida keltirib chiqarilgan (19) tenglamalar sistemasi qabul qilingan. Tenglamalar sistemasining umumiy yechimi quyidagi

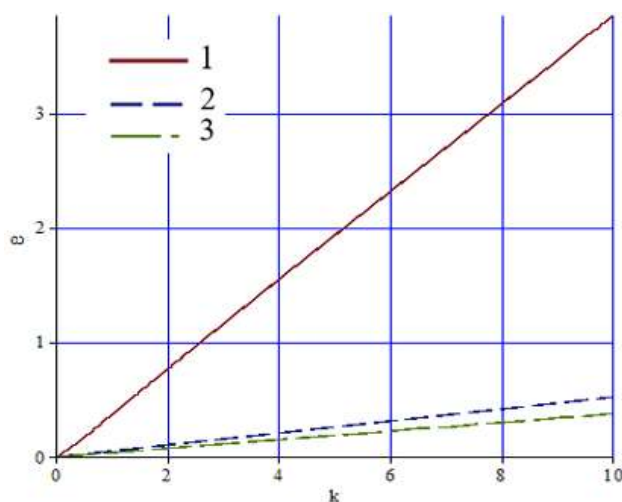
$$v_0^{(0)} = H_1 e^{i(-kz + \omega t)} \quad \text{va} \quad v_0^{(1)} = H_1 e^{i(-kz + \omega t)} \quad (28)$$

ko'rinishda izlangan, va chastotalar tenglamalar sistemasi olingan va u "Maple 17" amaliy dasturlar paketi yordamida sonli yechilgan. Hisoblashlarning olingan natijalari qovushoq suyuqliklar oqimlari ta'siridagi silindrik qobiqning buralma tebranishlari doiraviy chastotasining to'liq sonidan bog'liq grafiklari ko'rinishida tasvirlangan.

3-rasmda doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning ichida qobiqning 1 da ichida suyuqlik bor bo'lganda va 2 da suyuqlik bo'lmaganda chastota va to'liq soni orasidagi bog'lanish grafiklari keltirib o'tilgan. Agar uch qatlamli silindrik qobiqning ichida suyuqlik bo'lganda dispersiya holati bo'lishi suyuqlik bo'lmaganda esa chastota va to'liq soni bir biriga to'g'ri proporsional bo'lganligini kuzatishimiz mumkin. Doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvida chastota va to'liq sonini tahlil qilishda chastotaning qiymatlari o'zgarishini ko'rishimiz mumkin. Bundan tashqari doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning ichida qovushoq suyuqlik bo'lmaganda material qovushoq elastik bo'lganda chastota va to'liq soni orasidagi bog'lanish grafiklari keltirilgan.



3-rasm. Ichidagi suyuqlik kerosin, materiallari turli qobiqlarning buralma erkin tebranishlari chastotalari va to'liq sonlari orasidagi bog'lanishlar egri chiziqlari



4-rasm. Qovushoq suyuqlik ta'siri bo'lmaganda bir, ikki va uch qatlamli silindrik qobiqlarning chastota va to'liq son orasidagi bog'lanish grafiklarining qiyosiy tahlili.

4-rasmda doiraviy silindrik 1-bir qatlamli, 2-ikki qatlamli va 3-uch qatlamli elastik qobiqning chastotaviy tahlili taqdim etilgan. Bunda qobiq qatlami qancha

yuqori bo'lsa chastota kam bo'lishini ko'ramiz. lekin chastota qovushoq elastik jismdagi kabi so'nishga emas chastota to'lqin soni oshsa chastota ham oshganligini grafiklardan ham ko'rishimiz mumkin. Bu esa masalaning mohiyatiga mos keladi.

Bobning ikkinchi paragrafda ichki qovushoq suyuqlik tasiridagi doiraviy uch qatlamli silindrik qobiqning buralma tebranishlari uchun quyidagi masala qo'yilgan: uzunligi l ga teng bo'lgan qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi silindrik uch qatlamli qobiqni (r, θ, z) -silindrik koordinatalar sistemasida qaraymiz. Bunda Oz o'qini qobiqning simmetriya o'qi bo'ylab yo'naltirib qatlamlarni 1-rasmdagidek raqamlaymiz. Bu yerda a va a_3 orqali qobiqning ichki va tashqi radiuslari, a_1 va a_2 orqali uch qatlamli qobiq o'rta qatlamning ichki va tashqi radiuslari belgilangan. Doiraviy silindrik uch qatlamli elastik qobiqning tashqi sirtiga ta'sir etuvchi kuchlar nolga teng va erkin $z = 0$ uchiga vaqtning $t = 0$ paytida $M(t)$ burovchi momenti ta'sir qiladi. Boshlang'ich paytda qobiq tinch holatda va boshlang'ich tezligi nolga teng. Uch qatlamli silindrik qobiqning o'rta qatlami ixtiyoriy nuqtasining kuchlanganlik deformatsiyalanganlik holatini aniqlash talab etilsin.

Asosiy tenglama sifatida qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi uch qatlamli qobiq uchun keltirib chiqarilgan (17) buralma tebranishlar tenglamasi qabul qilingan.

Ushbu tenglamaning o'ng tomonidagi kuchlanish funksiyasini erkin holatda qarayotganimiz uchun nolga teng. Masalaning berilgan shartlaridan foydalansak boshlang'ich va chegaraviy shartlar quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

Boshlang'ich shartlar

$$t = 0, \quad U_\theta = \frac{\partial U_\theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial t^2} = \frac{\partial^3 U_\theta}{\partial t^3} = 0. \quad (29)$$

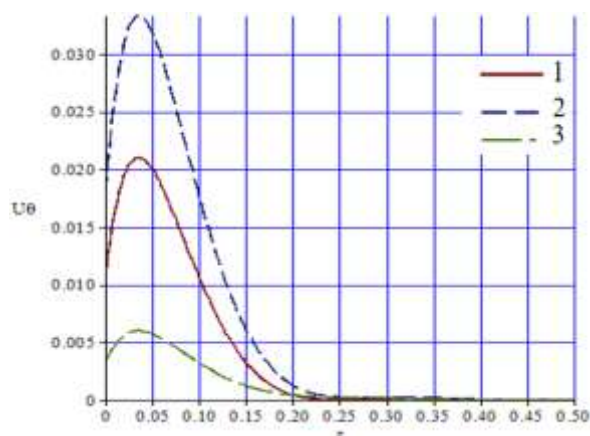
Chegaraviy shartlar

$$z = 0, \quad \mu l \frac{\partial U_\theta}{\partial z} = -M_\theta, \quad U_\theta = 0, \quad \xi U + V = 0. \quad (30)$$

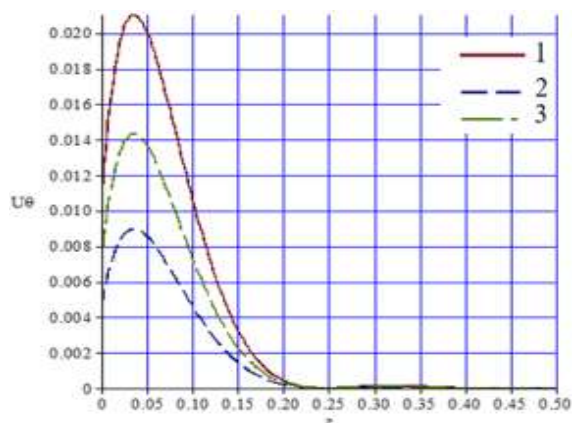
bu yerda μ -siljish koeffitsientlari, l -inersiya momentlari, M_θ -burovchi moment.

Bobning uchinchi paragrafida ichki qovushoq suyuqlik ta'siridagi doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlarida buralma ko'chish hisobi bajarilgan. Olingan natijalar grafiklar ko'rinishida keltirilgan. 5 - rasmda Burovchi moment ta'siridagi uch qatlamli silindrik qobiqning o'rta qatlam materiallari qiymatlari 1-alyuminiy, 2-po'lat, 3-titan bo'lganda ko'chish vektori U_θ komponentasining z koordinataga bog'lanish grafigi keltirilgan. Po'lat material olinganda U_θ ko'chish vektori komponentasining qiymati maksimal qiymati 0,038 ga teng bo'lib $z = 0,19$ kesimdan boshlab nolga yaqinlashadi. 6-rasmda erkin uchiga burovchi moment ta'siridagi uch qatlamli silindrik qobiqning tashqi qatlam material qiymatlari 1-polipropilen, 2-polimer, 3-zirconia bo'lganda ko'chish vektori U_θ komponentasining z koordinataga bog'lanish grafiglari keltirilgan. Grafiklardan ko'rinadiki polipropelin material olinganda polimer va

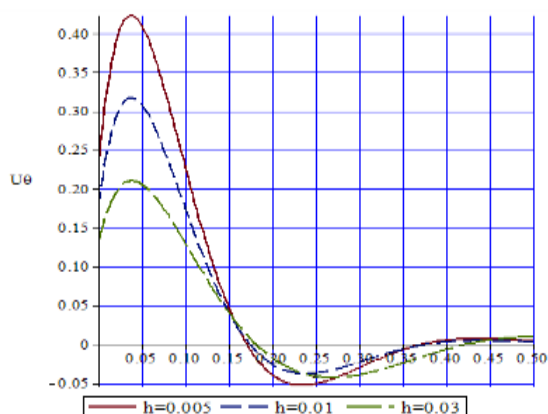
zirconia $z = 0,05$ da ko'chishning qiymati yuqori bo'lishini kuzatishimiz mumkin. 7-rasmda ichki qovushoq suyuqlik bilan



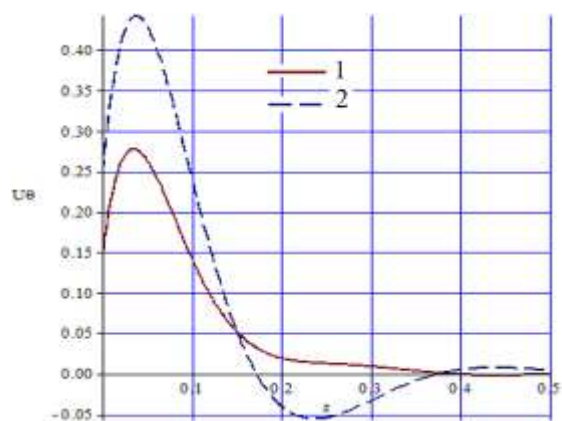
5-rasm. Doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning o'rta qatlam materiallari turlicha bo'lganda U_θ ko'chishning z koordinatadan bog'liq o'zgarishi



6-rasm. Doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning tashqi qatlam materiali turlicha bo'lganda U_θ ko'chishning z koordinatadan bog'liq o'zgarishi



7-rasm. Doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning o'rta qatlam qalinligi turlicha bo'lganda U_θ ko'chishning z koordinatadan bog'liq o'zgarishi



8-rasm. Ichki suyuqlik bo'lganda va suyuqlik bo'lmaganda doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning o'rta qatlam materiali turlicha bo'lganda U_θ ko'chishning z koordinatadan bog'liq o'zgarishi

ta'sirlashuvchi silindrik uch qatlamli qobiqning o'rta qatlami qalinligi turlicha bo'lganda ko'chish vektori komponentasining z koordinataga bog'lanish grafiklari keltirilgan. Bunda ta'sirlashuvchi qovushoq suyuqlik sifatida neft, o'rta qatlam alyuminiy tashqi qatlamlar polipropilen olingan. Olingan natijalardan ko'rinadiki agar o'rta qatlam materiali zichligi qancha yuqori bo'lsa ko'chish qiymatlari yuqori bo'lishini kuzatishimiz mumkin. 8-rasmda doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning ichida suyuqlik bo'lganda va bo'lmaganda ko'chish vektori komponentasining z koordinataga bog'liq grafiklari keltirilgan.

Bunda qovushoq suyuqlik sifatida kerosin suyuqligi olingan. $z = 0.04$ qiymatida ko'chish qiymatlari suyuqlik bo'lmaganda qaraganda suyuqlik bo'lganda 0.20 farq qilishi grafiklardan ko'rinib turibdi.

Bobning to'rtinchi paragrafida qovushoq suyuqlik oqimidagi doiraviy silindrik qobiqning buralma tebranishlarida urinma kuchlanishlar hisobi bajarilgan.

Doiraviy silindrik uch qatlamli qobiq o'rta qatlam materialining qalinliklari turlicha bo'lganda $\sigma_{r\theta}^{(0)}$ kuchlanish vektori komponentasining z koordinataga bog'liq o'zgarsih grafiki keltirilgan. Bunda qalinlik qancha yuqori bo'lsa kuchlanishning qiymatlari oshgan sari ko'proq zo'riqishga ega bo'lgan. Uch qatlamli qobiqning o'rta qatlamning materiali turlicha bo'lganda $\sigma_{r\theta}^{(0)}$ kuchlanish vektori komponentasining z koordinataga bog'liq o'zgarish grafiklari keltirilgan. Bundan ko'rinadiki materialning zichligi kichik bo'lsa kuchlanish yuqori ekanligini ko'rishimiz mumkin.

UMUMIY XULOSALAR

Dissertatsiya ishi bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar natijalari quyidagicha asosiy xulosalar chiqarishga imkon beradi:

1. Tashqi dinamik yuklar ta'siridagi qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik qobiqlarning kuchlanganlik deformatsiyalanganlik holatining hisob algoritmini yaratishni o'z ichiga olgan samarali matematik model va hisoblash metodikasi ishlab chiqilgan.

2. Qovushoq suyuqliklar bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik qovushoq-elastik qatlamning nostatsionar buralma tebranishlari tenglamalarining yechimlari yordamida qaralayotgan gidroqovushoq-elastik sistema ixtiyoriy nuqtasining kuchlanganlik deformatsiyalanganlik holatini bir qiymatli aniqlash algoritmi ishlab chiqilgan.

3. Qatlamli strukturalarning buralma tebranishlari tenglamalari hamda kuchlanganlik deformatsiyalanganlik holati hisobi algoritmi asosida, umumiy holda turli tabiatli tashqi dinamik yuklar ta'siridagi qatlamli qobiqlar tebranishlari uchun yangi boshlang'ich-chegaraviy masalalar shakllantirilgan.

4. Qobiqning yuk ko'taruvchi qatlamlari elastik va o'rta qatlami qovushoq-elastik bo'lgan holda o'rta qatlam qalinliklarining turli qiymatlarida $\omega \sim k$ bog'lanish turlicha xarakterga ega. Xususan, to'lqin sonining fiksirlangan qiymatlarida qobiq o'rta qatlami qalinligining oshib borishi, har uchta qatlam ham elastik bo'lgan holdan farqli o'laroq, tebranishlar chastotasining o'sishiga olib kelmaydi va to'lqin soni qiymatlarining butun spektri uchun $\omega \sim k$ (chastota-to'lqin soni) bog'lanish chiziqli bo'lib, proporsionallik xarakteriga ega emas;

5. Ichki qovushoq suyuqliklar ta'siridagi doiraviy silindrik qovushoq-elastik qatlamlarning garmonik buralma tebranishlari masalasi qatlam materiali xususiyatlarini hisobga olinib tadqiq etildi. Bunda qovushoq-elastiklik integral operatorining yadrosi eksponensial ko'rinishda, qovushoqlik va relaksatsiya parametrlari uch xil qiymatga ega bo'lgan holatlari tahlil qilindi.

6. Qovushoq suyuqlik ta'siridagi uzunligi chekli, bir uchi qistirib mahkamlangan elastik qobiqning dinamik yuk ta'sir etuvchi, erkin uchiga kinematik zarba qo'yilgan qobiqning nuqtasidagi kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holat parametrlarini fazoviy z koordinata va t vaqtga bog'liq ravishda aniqlash masalasi sonli yechildi. Olingan natijalar bo'yicha buralma ko'chish va urinma kuchlanishlar grafiklari asosida amaliy xulosalar chiqarildi.

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

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

АХАТОВ ХУДАЙНАЗАР НОРИМ УГЛИ

**НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРУГОВЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР С ВЯЗКОЙ
ЖИДКОСТЬЮ**

01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

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

Бухоро – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за B2025.2.PhD/FM1305.

Диссертация выполнена в Самаркандском государственном архитектурно-строительном университете имени Мирзо Улугбека

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.bmti.uz) и на информационно - образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz)

Научный руководитель:

Ялгашев Бурхон Файзуллаевич
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Сафаров Исмоил Иброхимович,
доктор физико-математических наук, профессор
Юлдошев Шарофиддин Сайфиддинович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

**Национальный исследовательский университет
«Ташкентский институт инженеров ирригации и
механизации сельского хозяйства»**

Защита диссертации состоится «28» октября 2025 года в 09³⁰ часов на заседании Научного совета Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 при Бухарском государственном техническом университете (Адрес: 100118, г.Бухара, ул.Каюм Муртозаева, 15. Тел.: (+99865) 223-78-84, факс: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарского государственного технического университета (Адрес: 100118, г.Бухара, ул.Каюма Муртозаева, 15. Тел.: (+99865) 223-78-84).

Автореферат диссертации разослан «09» октября 2025 года.
(Реестр протокола рассылки №7 от «29» августа 2025 года)



М.Х. Тешаев,

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

Р.А. Сабирова,

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

З.И. Болтаев,

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (PhD) диссертации)

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире исследование динамики многослойных элементов инженерных конструкций, применяемых в различных областях строительства и техники, в том числе создание новых моделей расчета их динамической деформации, близких к экспериментальным, применение современных численных методов занимает одно из ведущих мест. В мировом масштабе круговые многослойные цилиндрические оболочки требуют использования конструктивных элементов и внедрения новых методов расчета их динамических характеристик в корпусах подводных лодок, нагнетательных сооружений жидкости или топлива, при заправке самолетов в воздухе, в процессах бурения и для повышения их прочности при снижении веса различных технических устройств. В связи с этим в рамках современных требований конструкций, предъявляемых к инженерам и исследователям, чрезвычайно важно использовать обеспечение прочности и устойчивости конструкций в технике и строительстве за счет снижения их веса.

В мире ведутся научно-практические исследования, направленные на изучение нестационарных колебаний составных частей слоистых конструкций, в том числе динамики круговых цилиндрических трехслойных оболочек под воздействием различных внешних нестационарных динамических нагрузок. В связи с этим особое внимание уделяется совершенствованию существующих математических моделей и методов расчета и созданию новых в задачах, связанных с обеспечением прочности инженерных конструкций, в частности, в задачах расчета элементов трехслойной оболочки под действием динамических нагрузок. Особое внимание уделяется созданию математических моделей различных вибрационных процессов, определению с высокой точностью НДС элементов аэрокосмических, наземных, подземных и других инженерных конструкций, а также проведению новых научных исследований в области механики деформируемого твердого тела.

В нашей Республике в различных областях техники и строительства по разработке и реализации мероприятий, по созданию математической модели расчета деформации несущих элементов инженерных конструкций под действием динамических нагрузок разной природы осуществлены широкомасштабные работы и достигаются некоторые важные результаты. В стратегиях действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы, поставлены важные задачи, включающие «... модернизацию производства, техническое и технологическое обновление, производство, ... постепенное внедрение экономичных и эффективных современных технологий. ...»¹. При решении поставленных задач, в частности, для повышения несущей способности конструкций, в том числе с использованием нелинейно-упругих материалов, одной из важных проблем разработка усовершенствованных ма-

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № УП-4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

тематических моделей, описывающих процессы деформации элементов конструкций, приобретает важное значение.

В некоторой степени данное диссертационное исследование служит для выполнения задач, поставленных в нормативных актах, относящихся к данной сфере деятельности, таких как Указ УП-4947 Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года, «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», от 9 августа 2017 года под номером ПП-3190, «О мерах по совершенствованию проведения научных исследований в области сейсмологии, сейсмостойкого строительства и сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан» от 27 апреля 2018 г. Под номером ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», указ президента от 2 февраля 2018 года под номером ПП -3502 «О мерах по обеспечению в 2018-2022 годах генеральными планами населенных пунктов, улучшению деятельности проектных организаций, а также повышению качества подготовки специалистов в сфере градостроительства» и в других нормативных актах в этой области.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики IV "Математика, механика и информатика".

Степень изученности проблемы. Динамический расчет оболочек выполняется на основе классической теории, основанной на гипотезах Кирхгоффа-Лавы. Однако классическая теория не позволяет полностью рассчитывать компоненты НДС оболочки. Поэтому многие ученые работали над развитием этой теории, и эта работа продолжается и по сей день. Большой вклад в создание и совершенствование математической модели процессов взаимодействия круговых цилиндрических слоистых структур с вязкими жидкостями внесли многие зарубежные ученые, такие как И.Г.Филиппов, Х.Алтенбах, Э.И.Григолюк, С.Х.Аршад, М.Н.Наим, Абасси, Х.Яжуан, Ф.Пеллицано, П.Б.Гонсалвес, А.С.Сайёд, Й.М.Гугаль, Ж.Н.Редди, С.Г.Пшеничных, С.В.Иванов, Л.И.Могилевич, С.Б.Филиппов, В.В.Гайдаичук, К.Э.Котенко, Х.А.Шахид, Н.Н.Мухаммад, А.С.Чепурненко, А.Н.Гуз, Б.Б.Фирсанов и другие.

В частности, ряд узбекских ученых М.Мирсаидов, Р.И.Халмурадов, Х.Х.Худойназаров, К.Исмоилов, М.К.Усаров, А.Б.Ахмедов, Б.Мардонов, Т.Мавлонов, Р.Абдукаримов, И.С.Сафаров, Ш.Буркутбоев, Б.Ф.Ялгашев и ряд других узбекских ученых достигли значительных результатов в этом направлении.

Исследования по созданию динамического расчета оболочек, или, другими словами, уточненных теорий колебаний, имеют, в основном, два основных направления. Первое из них - разработка асимптотической теории и теорий типа Тимошенко и Рейсснера, а второе - создание теорий колебаний оболочек, основанных на использовании точных решений трехмерной задачи теории упругости в последние несколько десятилетий. По указанному методу

профессорами Г.И.Петрашеном и И.Г.Филипповым и рядом их учеников были предложены теории колебаний однородных (однослойных), слоистых упругих и вязкоупругих оболочек. При разработке теорий, по мнению ряда специалистов, возник ряд проблем, в частности:

граничные условия сформулированы относительно начальных частей перемещений точек средней поверхности одного из внутренних слоев оболочки. Такой подход приводит к некоторым неопределенностям, поскольку внешние нагрузки приложены к внешним поверхностям оболочки;

в качестве неизвестных исследуемых принимаются начальные части перемещений точек средней поверхности одного из внутренних слоев оболочки (в случае трехслойной оболочки в качестве средней поверхности принимается средняя поверхность заполняющего слоя). Число этих главных частей пропорционально числу перемещений и в общей сложности не должно превышать шести;

Но если граничные условия сформулированы точно, т. е. записаны относительно главных частей перемещений внешних поверхностей оболочки, то число неизвестных составит двенадцать. Это, в свою очередь, приводит к увеличению числа дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений, используемых для их определения, и к ряду математических проблем, связанных с их решением. Это положение признано и самими авторами;

примененные подходы позволяют исследовать слоистые оболочки с симметричной структурой только относительно принятой средней поверхности. Исходя из изложенного, можно отметить, что на сегодняшний день недостаточно изучены проблемы разработки теории нестационарных колебаний, методов и алгоритмов решения задач вибрации и устойчивости слоистых элементов, в частности трехслойных вязкоупругих оболочек, с учетом вязкоупругих свойств материала и под воздействием различных внешних динамических нагрузок.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Самаркандского государственного архитектурно-строительного университета имени Мирзо Улугбека №18.04.00-6 "Теоретическое и практическое исследование вопросов неоднородности, нелинейности, упругих свойств, динамики, сейсмостойкости и устойчивости строительных конструкций с учетом воздействия среды" (2000-2025 гг.).

Цель исследования. разработка математических моделей динамического расчета нестационарных осесимметричных колебаний круговых цилиндрических слоистых структур при взаимодействии с вязкой жидкостью; разработка алгоритмов определения полей перемещений и напряжений в точках произвольного сечения трехслойных оболочек; применение разработанных моделей для решения прикладных задач трехслойных композитных и однородных цилиндрических колебаний.

Задачи исследования:

разработка математической модели, учитывающей влияние внешних динамических нагрузок на нестационарные крутильные колебания вязкоупругих и упругих структур с круглым цилиндрическим слоем;

создание алгоритма определения напряженно-деформированного состояния точек произвольного поперечного сечения трехслойной вязкоупругой оболочки;

постановка новых практических задач и разработка метода расчета колебаний круговых цилиндрических слоистых структур под действием динамических нагрузок при взаимодействии с вязкой жидкостью;

исследование влияния геометрических и физико-механических характеристик вязкоупругих слоев при воздействии вязкой жидкости на закономерности зависимости компонент вектора перемещения тензора напряжения в произвольной точке поперечного сечения от координат и времени.

Объектом исследования являются круговые цилиндрические слоистые структуры, взаимодействующие с вязкой жидкостью.

Предметом исследования являются нестационарные колебания круговой цилиндрической вязкоупругой структуры под воздействием различных временных переменных нагрузок.

Методы исследования. В качестве метода исследования были использованы методы Г.И.Петрашова - И.Г.Филиппова по выводу уравнений без использования аксиом и гипотез, методы интегрального преобразования Фурье и Лапласа, а также другие аналитические и численные методы расчета и исследования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработано математическая модель динамического расчета крутильных колебаний с учетом нестационарного взаимодействия круговых цилиндрических слоистых структур с вязкой жидкостью, учитывающая влияние внешних динамических нагрузок;

доказаны, что на основе разработанных уравнений нестационарного колебания трехслойной вязкоупругой цилиндрической оболочки в частных случаях можно получать уравнения колебаний двухслойных оболочек, трехслойных и однородных стержней;

разработан эффективный алгоритм расчёта напряженно-деформированного состояния точек произвольного поперечного сечения круговых цилиндрических слоистых структур с требуемой точностью по пространственной координате и времени;

поставлены новые прикладные задачи для колебаний слоистой оболочки, взаимодействующей с внутренней вязкой жидкостью, а также разработаны методы решения частных задач о гармонических колебаниях и вынужденных колебаниях двух и трехслойной оболочки под действием динамических нагрузок при различных граничных условиях.

Практические результаты исследования заключается в следующем:

предложены математическая прикладная модель исследования крутильных колебаний трехслойных вязкоупругих оболочек под действием внешних динамических нагрузок и алгоритм однозначного определения НДС;

предложены результаты исследования закономерностей изменения свободных колебаний трехслойной упругой оболочки в зависимости от частоты, а также решения практических задач нестационарных крутильных колебаний трехслойной оболочки при различном закреплении краев оболочки;

динамические, в частности, при поперечных колебаниях слоистых структур под действием внешних нагрузок, изменения параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние его произвольных точек, в зависимости от координат и времени представлены в графическом виде.

Достоверность результатов исследования доказывается применение интегральных преобразований Фурье-Лапласа, методами разложения в степенные ряды, вывод уравнений колебаний на основе других математических подходов, подтверждается сравнением результатами с других авторов, в частности, результатами, полученными для однородной круговой цилиндрической оболочки, путем систематического исследования.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования объясняется разработкой и развитием методики вывода уточненных уравнений крутильных колебаний трехслойной оболочки, взаимодействующей с вязкой жидкостью; решением новых практических задач о симметричных колебаниях трехслойных упругих и вязкоупругих оболочек под действием внешних нагрузок, а также возможностью обобщения разработанных методов для оболочек с различным закреплении краев, в частности трех-, двухслойных и однородных оболочек. Практическая значимость результатов исследования объясняется тем, что аналитические методы и численные алгоритмы, направленные на нахождение НДС с требуемой точностью в процессе симметричных колебаний трехслойных упругих и вязкоупругих оболочек под действием внешних динамических нагрузок, могут быть применены на практике.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов, полученных при нестационарном взаимодействии круговых цилиндрических слоистых структур с вязкой жидкостью:

Расчет критических значений нормального напряжения, возникающего при воздействии внешней импульсной нагрузки в точках композитной трехслойной цилиндрической оболочки (трубы), содержащей вязкую жидкость, внедрен в практику ООО "KARVON PLAST" при определении предела выносливости в точках произвольного сечения трубопроводов и получены следующие результаты. (Справка № 02/15-1330 от 3 июня 2024 года Ассоциации "Узпромстройматериалы" Республики Узбекистан). В результате, с учетом оптимальной толщины трехслойных труб различного диаметра, внешних статических и динамических нагрузок и давления внутренней жидкости, с помощью расчета радиальных перемещений различных точек трубы, можно уменьшить толщину трубы на 0,1 мм и сэкономить материал, используемый для несущих карандашей, на 4-5%.

Расчет силовых параметров трехслойной трубы путем определения максимальных напряжений трубопроводов для подачи жидкости высокого давления под воздействием динамических нагрузок внедрен в ООО "UniverProStile." (Справка No 02/15-1330 от 3 июня 2024 года Ассоциации "Узпромстройматериалы" Республики Узбекистан). В результате научно обосновано, что определение критических значений нормального напряжения, возникающего под действием внешней импульсной нагрузки в точках композитной трехслойной цилиндрической структуры, содержащей вязкую сжимаемую жидкость, позволяет определить предел прочности в точках ее произвольного сечения, а полученные результаты позволяют снизить затраты на 5-7% по сравнению с нормой.

Публикация результатов исследования. Всего по теме исследования опубликовано 15 научных работ, из них 10 научных статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций доктора философии (PhD), в том числе 5 в республиканских и 5 в зарубежных изданиях (включенных в базу данных Scopus).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 110 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, приведены обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации и степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, указаны объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, даны сведения о внедрения результатов исследования, об опубликованных работах по теме диссертации и о структуре диссертации. Приведено краткое содержание каждой главы

Первая глава диссертации "Взаимодействие круговых цилиндрических слоистых структур с вязкой жидкостью" основана на общем обзоре литературы, посвященном изучению крутильных колебаний и равновесного состояния круговых цилиндрических структур, взаимодействующих с вязкой жидкостью, а также выбору основных уравнений движения, начальных и граничных условий для жидкости и вязкоупругого тела, выводу уравнений крутильных колебаний круговых цилиндрических трехслойных цилиндрических оболочек, взаимодействующих с вязкой жидкостью.

В первом параграфе приведен обзор исследований по динамике пластовых структур в результате изучения научных статей по теме диссертационной работы.

Во втором параграфе приведены основные соотношения трехмерной задачи колебаний вязкой жидкости и слоистых структур, исследуемых в рамках диссертационной работы. В исследовательской работе мы рассматриваем оболочку в цилиндрической системе координат (r, θ, z) . При этом ось Oz направлена вдоль оси симметрии оболочки (рис. 1). Нумеруем слои в порядке, показанном на рисунке 1. Здесь a и a_1 обозначают внутренний и внешний радиусы оболочки, а a_2 и a_3 - внутренний и внешний радиусы среднего слоя. В дальнейшем мы будем называть внешний несущий слой первым слоем, внутренний несущий слой - вторым, а средний - нулевым. Толщины первого, нулевого и второго слоев обозначим через h_1 , h_0 и h_2 соответственно;

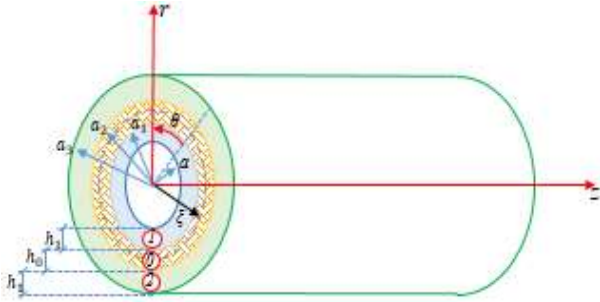


Рис. 1. Трехслойная цилиндрическая оболочка.

константы упругости материалов слоев, т.е. коэффициенты Ламе - через λ_s, μ_s плотности материалов слоев - через ρ_s . Также обозначим через $(s = 0, 1, 2)$ перемещения точек слоев $u_s(r, \theta, z, t)$, $v_s(r, \theta, z, t)$, $w_s(r, \theta, z, t)$ вдоль координатных осей.

Связь между компонентами напряжений $\sigma_{ij}^{(s)}, \tau_{ij}^{(s)}$ ($i, j = 1, 2, 3; s = 0, 1, 2$) и деформаций $\varepsilon_{ij}^{(s)}, \gamma_{ij}^{(s)}$ в точках слоев круговой цилиндрической оболочки, обобщенный закон Гука с учетом реологических свойств материалов слоя, выражается линейными операторами в виде интегральных соотношений Больцмана:

$$\sigma_{ii}^{(s)} = R_{\lambda s}(\varepsilon^{(s)}) + 2R_{\mu s}(\varepsilon_{ii}^{(s)}); \tau_{ij}^{(s)} = R_{\mu s}(\gamma_{ij}^{(s)}); \quad (i, j = 1, 2, 3; i \neq j), \quad (1)$$

$$\varepsilon^{(s)} = \varepsilon_{rr}^{(s)} + \varepsilon_{\theta\theta}^{(s)} + \varepsilon_{zz}^{(s)}$$

Вязкоупругие свойства материалов слоев определяются следующими интегральными операторами [81; п. 9]

$$R_{(\lambda, \mu)s}(\zeta) = (\lambda_s, \mu_s) \left[\zeta(t) - \int_0^t K_{(\lambda, \mu)s}(t - \tau) \zeta(\tau) d\tau \right], \quad (2)$$

где $\zeta(t)$ произвольная функция времени, Ядра вязкоупругих операторов $K_{\lambda s}(\tau), K_{\mu s}(\tau)$ - $R_{\lambda s}$ и $R_{\mu s}$ зависят от свойств материалов слоев. При этом $R_{\lambda s}$ и $R_{\mu s}$ - операторы возврата, Ядра $K_{\lambda s}(\xi)$ и $K_{\mu s}(\xi)$ - произвольные. При решении практических задач учитывается экспоненциальная функция.

Без учета объемных сил уравнения движения точек кругового цилиндрического слоя принимаются в виде

$$\sigma_{ij,j} = \rho_s \frac{\partial U_i}{\partial t^2}; (i, j = r, \theta, z) \quad (3)$$

где U_i - векторы перемещений точек слоя; t - время.

Уравнения движения точек оболочки представлены в следующих интегродифференциальных уравнениях, выражающих векторы перемещения слоев U_i через скалярные векторные потенциалы φ_s и $\vec{\psi}_s$.

$$R_s(\Delta\varphi^{(s)}) = \rho_s \ddot{\varphi}_s; R_{\mu s}(\Delta\vec{\psi}_s) = \rho_s \ddot{\vec{\psi}}_s; \quad (s=0,1,2) \quad (4)$$

Получены формулы, в которых через введенные скалярные и векторные потенциалы выражены векторы перемещений, все компоненты тензоров напряжений и деформаций.

Мы считаем колебания частиц вязкой сжимаемой жидкости малыми. В этом случае мы рассматриваем внутреннюю жидкость как сжимаемую жидкость. Тогда мы используем уравнения движения вязкой жидкости Навье-Стокса из теории линейных колебаний жидкости:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} - \nu' \Delta \vec{V} + \frac{1}{\rho'_0} \text{grad} p + \frac{1}{3} \nu' \text{grad} \text{div} \vec{V} = 0, \quad (5)$$

где $\vec{V}$ - вектор скорости произвольной частицы жидкости, ρ'_0 - плотность жидкости в покое, ν' - коэффициент кинематической вязкости.

Уравнение непрерывности жидкости

$$\frac{1}{\rho'_0} \frac{d\rho'}{dt} + \text{div} \vec{V} = 0, \quad (6)$$

ρ' - плотность возбужденной жидкости, формулы закона Навье-Стокса для компонент тензора напряжений в точках жидкости.

$$P_{ij} = -p \delta_{ij} - \frac{2\mu'}{3} \delta_{ij} \text{div} \vec{V} + \mu' e_{ij}, \quad (7)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (i, j = r, \theta, z)$$

где $P_{ij} (i, j = r, \theta, z)$ - компоненты тензора напряжений в жидкости, δ_{ij} - символ Кронекера, p - давление возбужденной жидкости. μ' - коэффициент вязкости

Помимо уравнения непрерывности для жидкости, уравнения Навье-Стокса и закона Навье-Стокса, мы также используем уравнение линейного состояния.

$$\frac{\partial p}{\partial \rho'} = a_0^2, \quad a_0 = \text{const}. \quad (8)$$

a_0 - скорость распространения звука в жидкости покоя. $\mu' = \rho'_0 \nu'$ - коэффициент вязкости.

Вводя скалярные векторные потенциалы G и $\vec{\chi}$ для движения вязкой жидкости, мы получаем уравнения для вязкой жидкости через следующие потенциалы.

$$\vec{V} = \frac{\partial}{\partial t} (\text{grad} G + \text{rot} \vec{\chi}), \quad (9)$$

где векторный потенциал $\vec{\chi}$ должен удовлетворять уравнению.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - \nu' \Delta\right) \bar{\chi} = 0$$

Граничные условия для крутильных колебаний трехслойной оболочки имеют следующий вид.

$$\sigma_{r\theta}^{(2)}(r, z, t) = F_{r\theta}^{(2)}(z, t) \quad (10)$$

где $F_{r\theta}^{(2)}(z, t)$ - функции внешних воздействий. Кроме того, на граничных поверхностях между слоями и частицами жидкости должны выполняться условия равенства перемещений и напряжений в соответствии с условиями контакта. Условия контакта между нулевым, первым и вторым слоями и частицами жидкости следующие.

$$\begin{aligned} V_{\theta}^{(1)}(a, z, t) &= \frac{\partial}{\partial t} u_{\theta}^{(1)}(a, z, t), & -p_{r\theta}(a, z, t) &= \sigma_{r\theta}^{(1)}(a, z, t), \\ u_{\theta}^{(0)}(a_1, z, t) &= u_{\theta}^{(1)}(a_1, z, t), & \sigma_{r\theta}^{(0)}(a_1, z, t) &= \sigma_{r\theta}^{(1)}(a_1, z, t), \\ u_{\theta}^{(0)}(a_2, z, t) &= u_{\theta}^{(2)}(a_2, z, t), & \sigma_{r\theta}^{(0)}(a_2, z, t) &= \sigma_{r\theta}^{(2)}(a_2, z, t). \end{aligned} \quad (11)$$

Начальные условия задачи равны нулю.

$$\psi_m(r, z, t) = \frac{\partial \psi_m(r, z, t)}{\partial t} = 0. \quad (12)$$

В третьем параграфе первой главы приведена математическая модель уравнений крутильных колебаний круговой цилиндрической трехслойной оболочки, взаимодействующей с внутренней вязкой жидкостью. Уравнения движения для кругового цилиндрического слоя и потоков жидкости, а также уравнения движения для тела, совершающего крутильные колебания в зависимости от осевой симметрии задачи, состоят из следующей системы.

$$\begin{aligned} M_{\mu_1}(\Delta \psi_1) &= \frac{1}{b_1^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2}, \quad M_{\mu_0}(\Delta \psi_0) = \frac{1}{b_0^2} \frac{\partial^2 \psi_0}{\partial t^2}, \\ M_{\mu_2}(\Delta \psi_2) &= \frac{1}{b_2^2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial t^2}, \quad \left(\frac{\partial}{\partial t} - \nu' \Delta\right) \bar{\chi} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Функции потенциала крутильной волны материалов слоев оболочки можно представить в следующем виде.

$$\psi_s(r, z, t) = \int_0^{\infty} \frac{\sin kz}{-\cos kz} \left\{ dk \int_{(i)} \bar{\psi} e_s^{qt} dq, \quad \chi(r, z, t) = \int_0^{\infty} \frac{\sin kz}{-\cos kz} \left\{ dk \int_{(i)} \bar{\chi} e_s^{qt} dq, \quad (14) \right. \right.$$

Далее, подставляя преобразования (14) в уравнения движения (13), получим следующие уравнения Бесселя:

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \alpha_s^2\right) \tilde{\psi}_s = 0, \quad \left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \gamma^2\right) \tilde{\chi} = 0, \quad (15)$$

где

$$\alpha_s^2 = \frac{q^2}{b_s^2} M_{\mu_s}^{-1} + k^2, \quad \gamma^2 = \frac{q}{\nu'} + k^2, \quad M_{\mu_s} = 1 - f(q), \quad f(q) = \int_0^\infty f(t) \cdot e^{-qt} dt$$

Общие решения уравнений Бесселя (15), удовлетворяющие условиям ограниченности, имеют следующий вид.

$$\tilde{\psi}_s(r) = H_s^{(1)} J_0(\alpha_s r) + H_s^{(2)} Y_0(\beta_s r); \quad (s = 0, 1, 2), \quad (16)$$

$$\tilde{\chi} = D_1 J_0(\gamma r)$$

где $H_s^{(i)}(k, p)$, $D_1(k, p)$, $(s = 0, 1, 2, i = 1, 2)$, r - интегральные константы, определяемые граничными условиями, не зависящими от радиальной переменной, $J_0(r)$, $Y_0(r)$ - модифицированные функции Бесселя.

Решая систему уравнений (10), (11), (12) и (13), получена математическая модель уравнения крутильных колебаний круговой цилиндрической трехслойной оболочки, взаимодействующей с вязкой жидкостью.

$$\left(M_{\mu_0}^{-1} \mu' \frac{a^2}{6} q \delta + \frac{a^2}{a_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - a_1^2}{12} \lambda_1\right)\right) \left(\frac{a_1^2}{4} \lambda_0 u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} \lambda_0 - \frac{2}{a_1^2}\right) u_{\theta,1}^{(0)}\right) = M_{\mu_0}^{-1} f_{r\theta}^{(1)}(k, q), \quad (17)$$

$$\frac{a_2^2}{a_3^2} \left(1 + \frac{a_2^2 - a_3^2}{4} \lambda_2\right) \left(\frac{a_2^2}{4} \lambda_0 u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} \lambda_0 - \frac{2}{a_2^2}\right) u_{\theta,1}^{(0)}\right) = M_{\mu_0}^{-1} f_{r\theta}^{(2)}(k, q).$$

Во второй главе диссертации “Нестационарное взаимодействие круговой цилиндрической двухслойной оболочки с вязкой жидкостью” выводятся уравнения крутильных колебаний двухслойной вязкоупругой, симметричной структуры оболочки, взаимодействующей с вязкой жидкостью. При этом граничные условия сформулированы относительно напряжений в точках внешних поверхностей оболочки и использован метод точных решений теории вязко упругости.

Первый параграф главы посвящен выводу уравнений крутильных колебаний при нестационарном взаимодействии круглой цилиндрической двухслойной оболочки с вязкой жидкостью. Используются уравнения движения (13) для цилиндрического слоя и потоков жидкости. На контактной поверхности слоев должны выполняться динамические условия, выраженные относительно касательных напряжений.

$$\sigma_{r\theta}^{(1)}(r, z, t) \Big|_{r=a_2} = F_{r\theta}^{(1)}(z, t). \quad (18)$$

Известно, что задачи гидроупругости ставятся на основе динамических и кинематических условий на поверхности контакта твердого тела и вязкой жидкости. При математической постановке задач о крутильных колебаниях элементов инженерных конструкций при нестационарном взаимодействии с вязкой жидкостью необходимо учитывать равенство касательных напряже-

ний на этой поверхности и использовать уравнение Навье-Стокса для движения жидкости. Скорость частиц жидкости должна быть равна скорости точек слоя. Тогда кинематические условия для слоев следующие

$$\begin{cases} u_{\theta}^{(0)}(r, z, t)|_{r=a_1} = u_{\theta}^{(1)}(r, z, t)|_{r=a_1}; \\ \sigma_{r\theta}^{(1)}(r, z, t)|_{r=a_1} = \sigma_{r\theta}^{(0)}(r, z, t)|_{r=a_1} \end{cases} \quad (19)$$

Кинематические условия для слоя и жидкости

$$\begin{cases} V_{\theta}(r, z, t)|_{r=a} = \frac{\partial}{\partial t} u_{\theta}(r, z, t)|_{r=a}; \\ \sigma_{r\theta}^{(0)}(r, z, t)|_{r=a} = -p_{r\theta}(r, z, t)|_{r=a} \end{cases} \quad (20)$$

$\vec{V}_{\theta}$ - вектор скорости частицы жидкости, V_i - его компоненты, p_{ij} ($i, j = r, \theta, z$) - компоненты тензора напряжений в жидкости

Начальные условия равны нулю.

$$\psi_s(r, z, t) = \frac{\partial \psi_s(r, z, t)}{\partial t} = 0. \quad (21)$$

В результате совместного решения системы уравнений (15), (19), (20) и (21) получена математическая модель уравнения крутильных колебаний круговой цилиндрической двухслойной оболочки, взаимодействующей с вязкой жидкостью.

$$\begin{aligned} & \frac{a_1^2}{4a_2^2} \left[4 + h_1(2a_1 + h_1)\lambda_1 + \frac{a_1^2 h_1}{4} (2a_1 + h_1)\lambda_1^2 \right] \times \left[\frac{a_1^2}{4} \lambda_0 u_{\theta,0}^{(0)} + \right. \\ & \left. + \xi \left(\frac{1}{2} (\lambda_0 - \frac{4}{a_1^2}) + \frac{a_1^2}{8} (\ln \frac{a_1}{\xi} - \frac{1}{4}) \lambda_0^2 \right) u_{\theta,1}^{(0)} \right] = \bar{M}_{\mu_1}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}(k, p)]. \\ & \left(\frac{a^2}{4} \lambda_0 - \frac{\mu' a^2}{6} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} q \delta_0 \right) u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} (\lambda_0 - \frac{4}{a^2}) + \right. \\ & \left. + \frac{a^2}{8} (\ln \frac{a}{\xi} - \frac{1}{4}) \lambda_0^2 - \frac{\mu'}{6} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} q \delta_0 - \frac{\mu' a^2}{12} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} \ln \frac{a}{\xi} q \delta_0 \lambda_0 \right) u_{\theta,1}^{(0)} = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

где h_1 - толщина внешнего слоя, μ' - коэффициент динамической вязкости, $\bar{M}_{\mu_0}$ - вязкоупругий оператор, ξ - радиус средней поверхности,

Во втором параграфе главы решена задача определения напряженно-деформированного состояния круговой цилиндрической двухслойной оболочки, взаимодействующей с вязкой жидкостью. При этом с учетом влияния потоков внутренне вязких сжимаемых жидкостей, текущих с постоянными скоростями, создан алгоритм определения напряженно-деформированного состояния круговых цилиндрических двухслойных оболочек при нестационарных крутильных колебаниях в точках их произвольного сечения. Данный алгоритм включает, что при крутильных колебаниях рассматриваемой гидроупругой системы только крутильные перемещения точек цилиндрического слоя $u_{\theta}^{(i)}$, напряжения в его сечениях $\sigma_{r\theta}, \sigma_{z\theta}$, а также касательные компонен-

ты векторов скоростей V_θ частиц потоков жидкостей и напряжения в точках вязких жидкостей $p_{r\theta}$ и $p_{z\theta}$ отличны от нуля.

В третьем параграфе главы исследована задача гармонических крутильных колебаний круговой цилиндрической двухслойной вязкоупругой оболочки, взаимодействующей с внутренними вязкими жидкостями. Для этого в качестве основных уравнений колебаний принята система уравнений (22).

В этом случае ядро $f(t-\tau)$ интегрального оператора вязкоупругости (3) принимается в следующем регулярном виде.

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\nu_n}{\tau_n} e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \nu_n = 1, \quad (23)$$

где ν_n -параметры вязкости тела; τ_n - время релаксации. В задаче получены значения численных результатов. Полученные результаты представлены графиками зависимости частоты колебаний от волнового числа.

В четвертом параграфе главы рассматривается цилиндрическая оболочка с внутренним радиусом a , внешним радиусом a_1 и длиной l , взаимодействующая с вязкой жидкостью с внутренней стороны в цилиндрической системе координат (r, θ, z) . На свободный конец оболочки наложен кинематический удар с амплитудой $z=0$, заданной как $g(t)$. Определим параметры напряженно-деформированного состояния в произвольном сечении цилиндрической оболочки в зависимости от пространственных координат z и t .

В качестве основного уравнения колебаний в системе уравнений (22), выведенной в первом параграфе, будем считать $a_1 = a_2$, получим следующую систему уравнений.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{a_1^2}{4} \lambda_0 u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} \left(\lambda_0 - \frac{4}{r_1^2} \right) + \frac{a_1^2}{8} \left(\ln \frac{a_1}{\xi} - \frac{1}{4} \right) \lambda_0^2 \right) u_{\theta,1}^{(0)} \right] = \bar{M}_{\mu_1}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}(k, p)] \\ & \left(\frac{a^2}{4} \lambda_0 - \frac{\mu' a^2}{6} \hat{M}_{\mu_0}^{-1} q \delta_0 \right) u_{\theta,0}^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} \left(\lambda_0 - \frac{4}{a^2} \right) + \frac{a^2}{8} \left(\ln \frac{a}{\xi} - \frac{1}{4} \right) \lambda_0^2 - \right. \\ & \quad \left. - \frac{\mu'}{6} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} q \delta_0 - \frac{\mu' a^2}{12} \bar{M}_{\mu_0}^{-1} \ln \frac{a}{\xi} q \delta_0 \lambda_0 \right) u_{\theta,1}^{(0)} = 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Поскольку в приведенной выше системе уравнений (24) испытуемыми являются $u_{\theta,0}^{(0)}$ и $u_{\theta,1}^{(0)}$, то начальные и граничные условия для этих испытуемых по формуле $u_\theta = u_{\theta,1}^{(0)} + \xi u_{\theta,0}^{(0)}$ получаем следующим образом:

Граничные условия

$$u_{\theta,0}^{(0)}(z, t) \Big|_{z=0} = \frac{A}{2\xi} \sin\left(\pi \frac{t}{t_1}\right); \quad u_{\theta,1}^{(0)}(z, t) \Big|_{z=0} = \frac{A}{2} \sin\left(\pi \frac{t}{t_1}\right); \quad (25)$$

$$u_{\theta,0}^{(0)}(z,t)\big|_{z=l} = 0; \quad u_{\theta,1}^{(0)}(z,t)\big|_{z=l} = 0. \quad (26)$$

Начальные условия

$$t = 0 \quad \text{да} \quad u_{\theta,0}^{(0)} = \frac{\partial u_{\theta,0}^{(0)}}{\partial t} = 0; \quad u_{\theta,1}^{(0)} = \frac{\partial u_{\theta,1}^{(0)}}{\partial t} = 0. \quad (27)$$

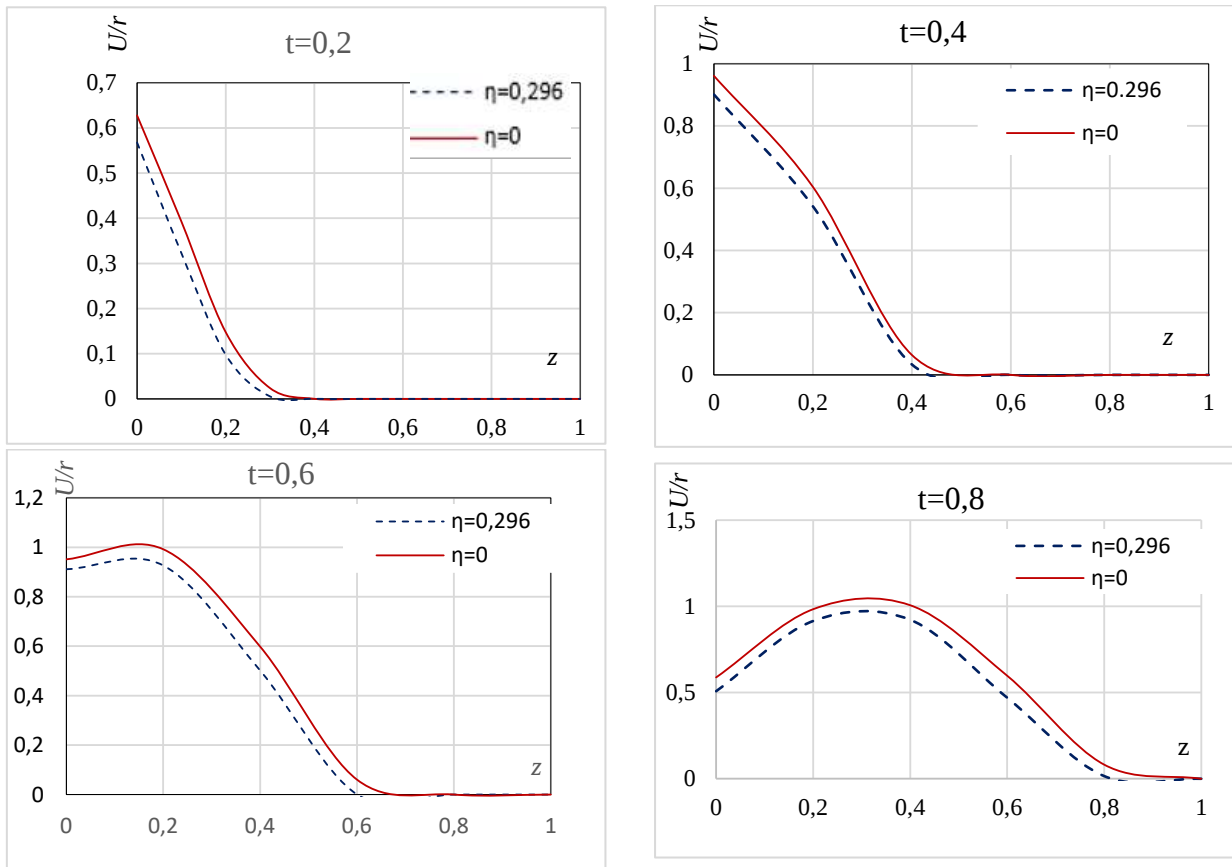


Рис. 2. $\eta = \rho'/\rho$ при различных значениях различных сечений оболочки ($t=0.2; 0.4; 0.6; 0.8$) изменения крутильных перемещений точек U_θ в зависимости от координат.

Численное решение уравнения (24), удовлетворяющее условиям (25), (26) и (27), выполнено с использованием математического пакета программы Maple-17 при крутильных колебаниях круговой цилиндрической оболочки в потоке внутренней вязкой жидкости. Полученные результаты представлены в виде таблиц и графиков.

На рис. 2 изображены графики изменения крутильных перемещений $t=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ точек времени U_θ в вязкой жидкости и без жидкости в зависимости от координат. Видно, что наличие внешней силы приводит к значительному увеличению амплитуды крутильного перемещения.

В третьей главе диссертации “Практические задачи при нестационарном взаимодействии круговой цилиндрической трехслойной оболочки с вязкой жидкостью” исследованы гармонические крутильные колебания трехслойных цилиндрических упругих и вязкоупругих оболочек с учетом и без учета влияния внутренних вязких жидкостей и проведены сравнительные работы. Помимо задач крутильных (гармонических или нестационарных) колебаний круговой цилиндрической трехслойной оболочки, решены задачи определения напряженно-деформированного состояния точек трехслойной оболочки

под действием крутящего момента при взаимодействии внутренней жидкости и построены их графики.

В первом параграфе главы исследована задача гармонических крутильных колебаний трехслойной цилиндрической оболочки, взаимодействующей с внутренними вязкими жидкостями. В качестве основных уравнений этих колебаний принята система уравнений (19), полученная в третьем параграфе первой главы. Общее решение системы уравнений ищется в виде

$$v_0^{(0)} = H_1 e^{i(-kz + \omega t)} \quad \text{и} \quad v_0^{(1)} = H_2 e^{i(-kz + \omega t)}. \quad (28)$$

Получена система уравнений частот, которая была решена с помощью пакета прикладных программ Maple 17. Полученные результаты расчетов представлены в виде графиков зависимости круговой частоты крутильных колебаний

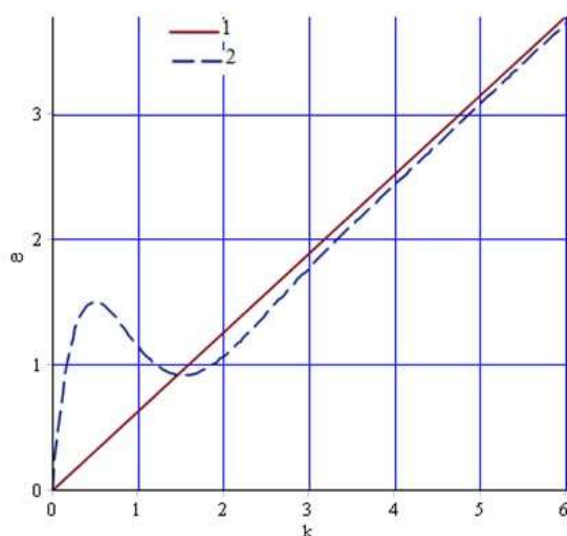


Рис. 3. Кривые зависимости между частотами свободных крутильных колебаний и волновыми числами оболочек с различными материалами, содержащими жидкость, керосин

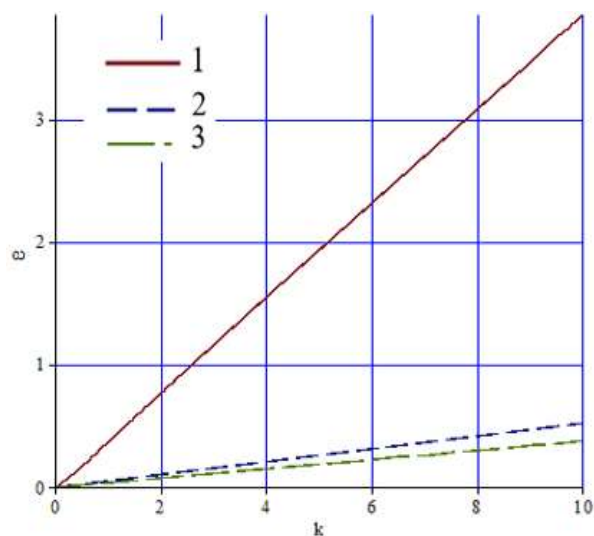


Рис. 4. Сравнительный анализ графиков зависимости между частотой и волной одно, двух и трехслойных цилиндрических оболочек при отсутствии воздействия вязкой жидкости.

цилиндрической оболочки от волнового числа при воздействии потоков вязких жидкостей.

При анализе частоты и волнового числа при взаимодействии круглой цилиндрической трехслойной оболочки с вязкой жидкостью мы можем видеть изменение значений частоты. Результаты между частотой и волновым числом при гармонических крутильных колебаниях трехслойной цилиндрической оболочки без учета влияния вязкой жидкости представлены на графиках. Кроме того, приведены графики зависимости между частотой и волновым числом при вязкоупругом материале при отсутствии вязкой жидкости внутри круглой цилиндрической трехслойной оболочки.

На рис. 4 представлен частотный анализ круглой цилиндрической одно, двух и трехслойной упругой оболочки. При этом мы видим, что чем выше слой оболочки, тем меньше частота, но частота не затухает, как в вязкоупру-

гом теле, мы также можем видеть из графиков, что при увеличении частоты и волнового числа частота увеличивается. Это соответствует сути вопроса.

Во втором параграфе главы поставлена следующая задача о крутильных колебаниях круглой цилиндрической трехслойной цилиндрической оболочки под действием внутренней вязкой жидкости. Рассмотрим цилиндрическую трехслойную оболочку (r, θ, z) , взаимодействующую с вязкой жидкостью длиной l , в цилиндрической системе координат. При этом направляя ось Oz вдоль оси симметрии оболочки, нумеруем слои, как показано на Рис. 1. Здесь через a и a_3 обозначены внутренний и внешний радиусы оболочки, а через a_1 и a_2 - внутренний и внешний радиусы среднего слоя трехслойной оболочки. Силы, действующие на внешнюю поверхность круглой цилиндрической трехслойной упругой оболочки, равны нулю, и на свободный конец $z=0$ в момент времени $t=0$ действует крутящий момент $M(t)$. В начальный момент оболочка находится в состоянии покоя, а начальная скорость равна нулю. Требуется определить напряженно-деформированное состояние любой точки среднего слоя трехслойной цилиндрической оболочки.

В качестве основного уравнения принято уравнение крутильных колебаний (17) для трехслойной оболочки, взаимодействующей с вязкой жидкостью. Поскольку мы рассматриваем функцию напряжения в правой части этого уравнения в свободном состоянии, она равна нулю. Используя заданные условия задачи, начальные и граничные условия могут быть выражены следующим образом:

Начальные условия

$$t = 0, \quad U_\theta = \frac{\partial U_\theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial t^2} = \frac{\partial^3 U_\theta}{\partial t^3} = 0. \quad (29)$$

Граничные условия

$$z = 0, \quad \mu l \frac{\partial U_\theta}{\partial z} = -M_\theta, \quad U_\theta = 0, \quad \xi U + V = 0. \quad (30)$$

где μ - коэффициенты сдвига, l - моменты инерции, M_θ - крутящий момент.

В третьем параграфе главы выполнен расчет крутильного перемещения при крутильных колебаниях круговой цилиндрической трехслойной оболочки под действием внутренней вязкой жидкости. Полученные результаты представлены в виде графиков. На рис. 5 приведен график зависимости компоненты U_θ вектора перемещения от координаты z при различных значениях материалов среднего слоя трехслойной цилиндрической оболочки под действием крутящего момента. При получении стального материала максимальное значение компоненты вектора перемещения U_θ равно 0,038 и приближается к нулю, начиная с сечения $z=0,19$.

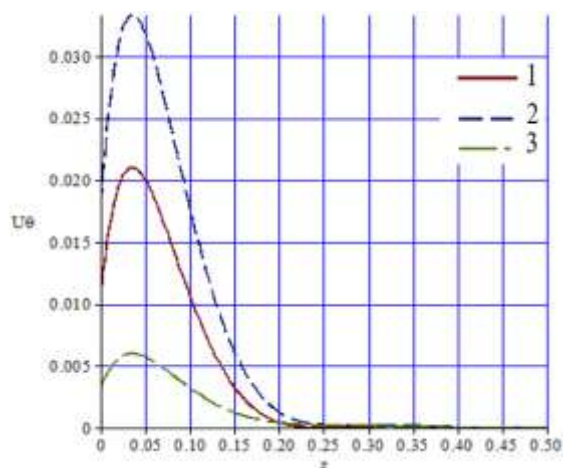


Рис. 6. Изменение смещения U_θ в зависимости от координаты z при различных материалах среднего слоя круглой цилиндрической трехслойной оболочки

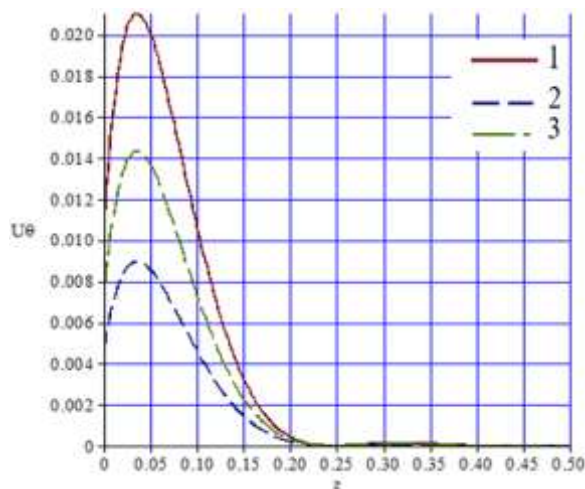


Рис. 7. Изменение U_θ перемещения круглой цилиндрической трехслойной оболочки в зависимости от z координаты при различном материале внешнего слоя

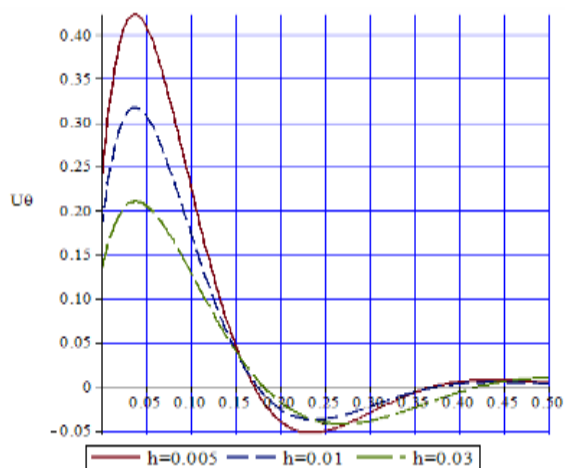


Рис. 8. Изменение перемещения U_θ от координаты z при различной толщине среднего слоя круглой цилиндрической трехслойной оболочки

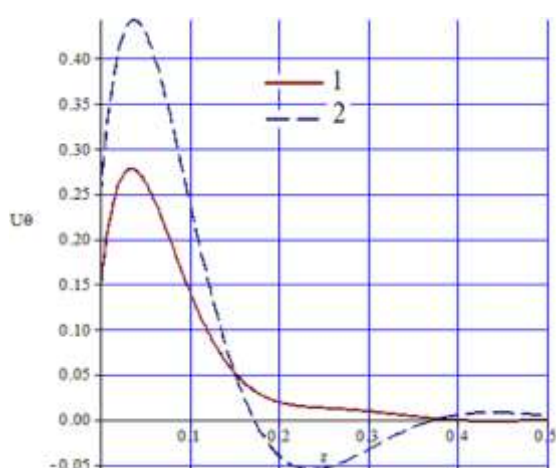


Рис. 9. Изменение перемещения U_θ в присутствии внутренней жидкости и в отсутствие жидкости в зависимости от координаты z

На рис. 6 приведены графики зависимости компоненты вектора перемещения U_θ от координаты z при различных значениях материалов внешнего слоя трехслойной цилиндрической оболочки под действием крутящего момента на свободном конце. Из графиков видно, что при получении полипропиленового материала мы можем наблюдать, что значение смещения в полипропилене и цирконии при $z=0.05$ выше.

На рис. 8 приведены графики зависимости компоненты U_θ вектора перемещения от координаты z при различной толщине среднего слоя трех цилиндрических оболочек, взаимодействующих с внутренней вязкой жидко-

стью. В качестве взаимодействующей вязкой жидкости была взята нефть, средний слой алюминия, внешний слой полипропилен.

При этом в качестве вязкой жидкости была взята керосиновая жидкость. Из графиков видно, что значения переноса при наличии жидкости по сравнению с отсутствием жидкости отличаются на 0.20. В четвертом параграфе главы выполнен расчет касательных напряжений крутильных колебаний кругового стержня в потоке вязкой жидкости. При этом чем выше толщина, тем большее напряжение имелось по мере увеличения значений напряжения. Из этого видно, что напряжение выше, если плотность материала мала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований по диссертационной работе позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Разработана эффективная математическая модель и методика расчета, включающая создание алгоритма расчета НДС круговых цилиндрических оболочек, взаимодействующих с вязкой жидкостью под действием внешних динамических нагрузок.

2. Разработан алгоритм однозначного определения НДС произвольной точки, рассматриваемой гидровязкоупругой системы с помощью решений уравнений стационарных крутильных колебаний кругового цилиндрического вязкоупругого слоя, взаимодействующего с вязкими жидкостями.

3. На основе уравнений крутильных колебаний слоистых структур и алгоритма расчета НДС в общем случае сформулированы новые начально-краевые задачи для колебаний слоистых оболочек под действием внешних динамических нагрузок различной природы.

4. В случае упругости несущих слоев оболочки и вязкоупругости срединного слоя зависимость при различных значениях толщины среднего слоя имеет различный характер. В частности, при фиксированных значениях волнового числа увеличение толщины срединного слоя оболочки, в отличие от случая, когда все три слоя упругие, не приводит к увеличению частоты колебаний, и для всего спектра значений волнового числа (частотно-волновое число) зависимость является нелинейной и не носит пропорционального характера.

5. Исследована задача гармонических крутильных колебаний круговых цилиндрических вязкоупругих слоев под действием внутренних вязких жидкостей с учетом свойств материала слоя. При этом ядро интегрального оператора вязкоупругости имеет экспоненциальный вид, а параметры вязкости и релаксации имеют три разных значения.

6. Численно решена задача определения параметров напряженно-деформированного состояния упругой оболочки конечной длины под действием вязкой жидкости в точке, подверженной динамической нагрузке, сво-

бодному концу которой наложен кинематический удар, в зависимости от пространственной координаты и времени. На основании полученных результатов были сделаны практические выводы на основе графиков крутильных перемещений и касательных напряжений.

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

**SAMARKAND STATE ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION UNI-
VERSITY NAMED AFTER MIRZO ULUG‘BEK**

AXATOV XUDAYNAZAR NORIM O‘G‘LI

**NONSTATIONARY INTERACTION OF CIRCULAR CYLINDRICAL
LAYERED STRUCTURES WITH A VISCOUS FLUID**

01.02.04 - Mechanics of Deformable Solids

Doctor of Philosophy (PhD) dissertation in Physics and Mathematics

ABSTRACT

The topic of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD) is registered in the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan for. B2025.2.PhD/FM1305.

The dissertation was carried out at the Samarkand University of Architecture and Civil Engineering named after Mirzo Ulugbek.

The abstract of the dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website www.bmti.uz and on the website of “ZiyoNet” Information and educational portal www.ziynet.uz.

Scientific supervisor:

Yalgʻashev Burxon Fayzullayevich
Doctor of physical and mathematical sciences, associate professor

Official opponents:

Safarov Ismoil Ibrohimovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Yuldoshev Sharofiddin Sayfiddinovich
Doctor of Technical Sciences, Professor

Leading organization:

**“Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”
National Research University**

Defense will take place «28» October 2025 at 09³⁰ at the meeting of Scientific Council number Phd.03/27.02.2021.FM.101.02. Bukhara State Technical University. (Address: 100118 Qayum Murtozayev street, Bukhara, Phone: (+99865) 223-78-84, fax: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Bukhara State University (is registered № 473) (Address: 100118 Qayum Murtozayev street, Bukhara, Phone: (+99865) 223-78-84,).

Abstract of dissertation sent out on «09» October 2025 year
(Mailing report № 7 on «29» August 2025 year)



M.Kh. Teshaev

Chairman of the Scientific Council for Awarding Academic Degrees, Dr.Sc. (DSc) in Physics and Mathematics, Professor

R.A. Sabirova

Scientific Secretary of the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees PhD in Physical and Mathematical Sciences

Z.I. Boltayev

Chairman of the Scientific Seminar under the Scientific Council for the Award of Academic Degrees (DSc) in Physics and Mathematics, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the study. Development of mathematical models for the dynamic calculation of non-stationary axially symmetric oscillations of circular cylindrical layered structures in interaction with a viscous fluid; creation of algorithms for determining the fields of displacements and stresses at the points of arbitrary cross-sections of three-layer shells; application of the developed models for solving applied

The object of the research is circular cylindrical layered structures interacting with a viscous fluid.

The subject of the research is the non-stationary oscillations of a circular cylindrical viscoelastic structure under the influence of various time-varying loads.

Research methods. As a research method, G.I. Petrashen-I.G. Filippov methods for deriving equations without using axioms and hypotheses, Fourier and Laplace integral transform methods, as well as other analytical and numerical calculation and research methods were used.

The scientific novelty of the study.

- a mathematical model for the dynamic calculation of torsional vibrations has been created, taking into account the non-stationary interaction of circular cylindrical layered structures with a viscous fluid, taking into account the influence of external dynamic loads;

- an effective algorithm for calculating the stress-strain state of points of an arbitrary cross-section of circular cylindrical layered structures with the required accuracy in spatial coordinates and time has been developed;

- new applied problems for the oscillations of a layered shell interacting with an internal viscous fluid have been posed, and methods for solving particular problems on harmonic oscillations and forced oscillations of a two- and three-layer shell under dynamic loads under various boundary conditions have been developed.

Reliability of the research results. The application of Fourier-Laplace integral transforms, decomposition methods into power series, derivation of vibration equations based on other mathematical approaches is confirmed by the results of other authors, in particular, the results obtained for a homogeneous circular cylindrical shell, through systematic research.

Publication of research results. 15 scientific works have been published on the topic of the dissertation, including 10 scientific articles in scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations (PhD), including 5 in republican and 5 in foreign publications (included in the Scopus database).

Structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The volume of the dissertation is 110 pages.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Isroilov Sh.N., Axatov X.N., Norqulova Z. Doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoq suyuqlik ta'sirida erkin bo'ylama-radial tebranishlari Namangan Davlat Universiteti ilmiy axbarotnomasi – 2024. – №3. 102-107 b.(01.00.00, №4)
2. Xudoyberdiyev Z., Xudoyberdiyeva Sh., Axatov X. Erkin tayangan uch qatlamli elastik plastinkaning simmetrik tebranishlari // Samdu ilmiy axbarotnomasi 2019, №3 (115) 29-33 b. (01.00.00, №4)
3. Isroilov Sh.N., Axatov X.N., Amirov I.N. Frequency analysis during non-stationary interaction of two-layer viscoelastic shell with viscose liquid // *International Bulletin of Engineering and Technology*. – 2023. – Vol. 4, № 12. – Pp. 26-30. – DOI: <https://doi.org/10.56378/NHSU20240227>. Impact Factor (2023): 9.1
4. Khudayberdiyev Z.B., Isroilov S.N., Axatov X.N., Usanov R.S. Non-stationary vibrations of three-layered elastic plate // *ISJ Theoretical & Applied Science*. – 2020. – No. 08(88). – P. 65-72. Impact Factor (2020): 6.630. Doi: <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.08.88.16>
5. Khayrulla Khudoynazarov; Khudaynazar Akhatov Comparative analysis of torsional vibration of circular cylindrical elastic and viscoelastic shells // *AIP Conf. Proc.* 3265, 050027 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0265502> (№3 Scopus IF=0.189)
6. Khudoynazarov, A. Gadayev., Kh Akhatov (2023) Torsional vibrations of a rotating viskoelastic rod // E3S Web of Conferences 365, 02016 (2023) CON-MECHYDRO (№3 Scopus IF=0.38)
7. Khudoynazarov Kh., Akhatov Kh. Free torsional vibrations of a three-layer viscoelastic cylindrical structure // *AIP Conf. Proc.* 3244, 060031 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0242032> (№3 Scopus IF=0.189)
8. Khalmuradov R.I., Yalgashev B.F., Akhatov Kh.N. Frequency analysis of free torsional vibrations of a threelayer cylindrical viscoelastic shell // *AIP Conf. Proc.* 3119, 020004 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0218212> (№3 Scopus IF=0.189)
9. Khalmuradov R.I., Yalgashev B.F., Akhatov Kh.N. Refined equations of torsional vibrations of a three-layer cylindrical viscoelastic shell // Cite as: *AIP Conference Proceedings* 2637, 030026 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0121480> (№3 Scopus IF=0.189).
10. Khalmuradov R.I., Yalgashev B.F., Akhatov Kh. Calculation of displacements in torsional vibration of circular cylindrical layered viscoelastic structures // *AIP Conf. Proc.* 3177, 050013 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0295331> (№3 scopus).
11. Kholiqov D., Usmonov U., Akhatov Kh. Round three-layer cone elastic shell torsional vibration // *AIP Conf. Proc.* 3177, 050017 (2025) <https://doi.org/10.1063/5.0295940> (№3 scopus).

II bo'lim (II часть; part II)

12. Abdukhamidov S. K., Akhatov Kh. N., Khudoykulov Sh. Sh. Free Vibrations of an Elastic Two-Layer Plate // International Journal of Innovative Analyses and Emerging Technology ISSN 27924025 (online), Published under Volume: 1 Issue: 4 in September 2021

13. Yalg'ashev B.F., Axatov X.N., Isroilov Sh. N. Qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlarida ko'chishlar hisobi // Mexanikada fan ta'lim, va ishlab chiqarish integratsiyasi: muommolar yechimlar va istiqbollar mavzusidagi xalqaro ilmiy texnik anjumani 2025-yil 1-3 may, 72-79 bet

14. Axatov X N. Qovushoq suyuqlik bilan ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik ikki qatlamli qobiqning kuchlanganlik deformatsiyalanganlik holati Me'morchilik va qurilish muammolari ilmiy-texnik jurnal. –Samarqand. – 2025 – №2. 263-265 b. (05.00.00, №14)

15. Yalg'ashev B. F., Axatov X. N. Uch qatlamli silindrik qobiqning xususiy buralma tebranishlari Me'morchilik va qurilish muammolari ilmiy-texnik jurnal. – Samarqand. – 2023 – №3 274-277 b. (05.00.00, №14)

16. X.N.Axatov., E.A.Ismoilov. Doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoq elastik va elastik qobiqning chastotaviy tahlili // Yosh olimlar axbarotnomasi (ilmiy jurnal) 2023, №4 (1-qism) 6-9 bet

17. X.N.Axatov Doiraviy silindrik qobiqning buralma tebranishlari // Kondensirlangan moddalar va muhandislik fizikasi muammolari Respublika ilmiy-amaliy konfrensiyalari 2022-Samarqand

18. Gadayev A.B., Axatov.X.N (2022) Qovushoq siqiluvchan suyuqlik oqimini va aylanish ta'sirini hisobga olganda silindrik qatlamning o'qqa nisbatan simmetrik tebranishlari // Nazariya va amaliyot» nomli № 07-sonli ilmiy, masofaviy, onlayn konferensiyasi <https://doi.org/10.5281/zenodo.5714668> 47-53 bet

19. R. I. Khalmuradov., B. F. Yalgashev., Kh.N. Akhatov Frequency analysis of free torsional vibrations of a three layer cylindrical viscoelastic shell // Международная научно-практическая конференция «Рахматулинские чтения» 26 –27 мая Ташкент-2023

20. Axatov X.N., Yaxshiboyev Sh.R. Doiraviy silindrik ikki qatlamli qobiqning qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvi Me'morchilik va qurilish muammolari ilmiy-texnik jurnal. –Samarqand.–2022.–№3. 76-78 b.(05.00.00, №14)

21. Axatov X.N., Gadayev A.B., Ismoilov E.A. Doiraviy silindrik qovushoq elastik qobiqning qovushoq suyuqlik bilan o'zaro ta'sirlashuvi // Bino va inshootlar zilzilabardoshligi sohasida kadrlar tayyorlashning istiqbollari mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani 2023

22. Худайбердиев З Б., Ахатов Х. Н., Худайбердиева Ш.М. Уравнения поперечных колебаний упругой трехслойной пластины // «Наука, образование, инновации: актуальные вопросы и современные аспекты», состоявшейся 10 октября 2020 г. в г. пенза

23. Xudoyberdiyev Z., Isroilov Sh., Axatov X. Ikki qatlamli elastik plastinka simmetrik tebranishlari // Me'morchilik va qurilish muammolari (ilmiy-texnik jurnal) 2019, №1 (2-qism) 133-136 bet

24. Yaxshiboyev Sh.R., Axatov.X.N. Ikki qatlamli qovushoq-elastik plastinkaning bo'ylama tebranishlari // Globallashuv davrida matematika va amaliy matematikaning dolzarb masalalari Respublika ilmiy anjumani 1-2 iyun 2021 yil.

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

Bosishga ruxsat etildi: 7.10.2025 Bichimi: 60x84 1/16.
“Times New Roman” garniturada raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i: 3,5. Adadi 100. Buyurtma № 268.
Guvohnoma AI №178.08.12.2010

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

