

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI**

YALG‘ASHEV BURXON FAYZULLAYEVICH

**QOVUSHOQ SUYUQLIK BILAN O‘ZARO TA’SIRLASHUVCHI
QATLAMLI SILINDRIK QOVUSHOQ-ELASTIK QOBIQNING
NOSTATSIONAR TEBRANISHLARI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FAN DOKTORI (DSc)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Doktorlik (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of abstract doctoral (DSc) dissertation

Yalg‘ashev Burxon Fayzullayevich

Qovushoq suyuqlik bilan o‘zaro ta’sirlashuvchi qatlamli silindrik qovushoq-elastik qobiqning nostatsionar tebranishlari 3

Ялгашев Бурхон Файзуллаевич

Нестационарные колебания слоистой цилиндрической вязкоупругой оболочки, взаимодействующей с вязкой жидкостью 31

Yalgashev Burkxon Fayzullaevich

Unsteady vibrations of a layered cylindrical viscoelastic shell interacting with a viscous fluid 60

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ

List of published works 64

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI**

YALG‘ASHEV BURXON FAYZULLAYEVICH

**QOVUSHOQ SUYUQLIK BILAN O‘ZARO TA’SIRLASHUVCHI
QATLAMLI SILINDRIK QOVUSHOQ-ELASTIK QOBIQNING
NOSTATSIONAR TEBRANISHLARI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FAN DOKTORI (DSc)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Fan doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № 31.12.2020/B2020.4.FM90 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasi (www.samdu.uz) va «Ziyonet» Axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi: Xudoynazarov Xayrulla
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: Mardonov Batirjan
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Pshenichnov Sergey Gennadiyevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Safarov Ismoil Ibroximovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot: «Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti» Milliy tadqiqot universiteti

Dissertatsiya himoyasi Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti huzuridagi DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 raqamli Ilmiy kengashning 2024-yil «02» fevral soat 19:00 da majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 140104, Samarqand sh., Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (+99866) 239-11-40, faks: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: devonxona@samdu.uz).

Dissertatsiya bilan Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (12/raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 140104, Samarqand sh., Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (+99866) 239-17-25.

Dissertatsiya avtoreferati 2024-yil «16» yanvar kuni tarqatildi.
(2024-yil «16» yanvar) dagi «1» raqamli restr bayonnomasi).



R.I.Xalmuradov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
texnika fanlari doktori, professor

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

K.I.Ismayilov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi o'rinbosari,
texnika fanlari doktori, professor

KIRISH (fan doktori (DSc) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda turli xil muhandislik ob'ektlarining asosiy yuk ko'taruvchi elementlarini tashkil qiluvchi qatlamli kompozit konstruksiyalarning tejamkorlik samaradorligini aniqlash asosida materiallar sarfini kamaytirish darajasini baholash hamda undan oqilona foydalanish muammolariga juda katta ahamiyat berilmoqda. Zamonaviy muhandislik amaliyotida bunday tadqiqotlarga bo'lgan ehtiyoj, qurilish va mashinasozlik sohasidagi eng muhim vazifalardan biri bo'lib, pirovardida konstruksiya va mashinalarning og'irligini kamaytirish, ishonchliligi hamda mustahkamligini oshirish, shuningdek ularga sarflanadigan material va xarajatlarni kamaytirishni ta'minlovchi tadqiqotlarga bo'lgan talab darajasi tobora ortib bormoqda. Shu sababli, dunyoning texnik jihatdan rivojlangan mamlakatlarida, muhandislik inshootlarining mustahkamligini oshirish muammolarini hal qilish, ularni zamonaviy ekstremal sharoitlarga mos ekspluatatsiya qilish uchun zarur bo'lgan keng diapazondagi dinamik yuklarning ta'siri ostidagi qatlamli kompozit elementlarning harakatini o'rganish uchun nazariy va eksperimental tadqiqotlarga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda qatlamli kompozit materiallardan, xususan, gaz-suyuq muhitlar bilan o'zaro ta'sirlashuvchi quvurlar va ulardan tayyorlangan muhandislik mahsulotlari amaliyotda tobora ko'proq foydalanilmoqda. Ushbu yo'nalishda yuqorida sanab o'tilgan muammolarning yangi ilmiy-texnik yechimlarini izlab topishga qaratilgan yangi, noan'anaviy materiallarni yaratish va ulardan uchish apparatlari, mashinalar va konstruksiyalar elementlarini yasash va amaliyotga joriy etish borasida jadal ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Olimlarning tadqiqotlari, ayniqsa yuqori mustahkamlikka ega yangi kompozit materiallar yaratish va ular asosida yangi yengil va mustahkam konstruksiyalar ishlab chiqarishga, ularning amaliyot uchun muhim xususiyatlarini oldindan yaratishga qaratilgan. Shuning uchun turli tebranish jarayonlarining matematik modellarini yaratishga, kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqroq topishga, shuningdek, o'zaro ta'sirni hisobga olgan holda kompozit materiallardan yasalgan turli muhandislik inshootlarining konstruktiv elementlarini raqamli tadqiq qilishga 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 rivojlantirish-ning 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 plastinkalar yordamida

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.

amalga oshirish maqsadida qurilmalar 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-tadbirlarini 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 PFI- IV “Matematika, mexanika va informatika” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi. Dinamika masalalarini o‘rganishning turli usullari va deformatsiyalanuvchi qattiq jismlarning uzluksiz muhit bilan o‘zaro ta‘siriga oid turli xil tadqiqot usullari, shuningdek, samarali matematik modellarni yaratishning fundamental nazariy va eksperimental muammolari I.G.Filippov va V.G.Cheban, I. Lottati, I. Elishakoff, X. Yajuan, V. Abassi, F. Pellicano, P. B. Gonsalves, A.S. Sayyod, Y.M. Ghugal, J.N. Reddi, S.G.Pshenichnov, S.V.Ivanov, L.I. Mogilevich, B.A.Xudayarov, V.M.Dubrovin, T.A. Butina, Q. Sulstonov, M. Mirsaidov, R. A. Abdikarimov, A. B. Ahmedov va boshqa olimlarning ishlarida ko‘rilgan.

Tizimlardagi nostatsionar tebranishlarining aniqlashtirilgan nazariyalarini ishlab chiqish bo‘yicha tadqiqotlarga qiziqish kuchaymoqda. Chiziqli nazariya masalalarini aniq uch o‘lchamli shakllantirish asosida muhitni, ko‘p qatlamlilikni hamda ishqalanish kuchlarini hisobga olgan holda elastik (G.I.Petrashen) va qovushoq-elastik (I.G.Filippov) plastinkalar va doiraviy sterjnlarning bo‘ylama va ko‘ndalang tebranishlarining aniqlashtirilgan nazariyalari ishlab chiqilgan. X.Xudoynazarov tomonidan qovushoq elastik silindrik qobiqning nostatsionar tebranishlari nazariyasini ishlab chiqildi va bunqa mavjud tebranish nazariyalaridan farqli ravishda birinchi marta silindrik qobiq nuqtalarining tebranishlarini baholovchi, asosiy sirt sifatida "oralik" sirt kiritildi va uning radiusi qobiqning ichki va tashqi radiuslari orqali ifodalanishi mumkin.

Bunda olingan tebranish tenglamalari S.P.Timoschenko tipidagi klassik va aniqlashtirilgan nazariyalardan farqli o‘laroq avtomatik ravishda aylanish inertsiyasini va ko‘ndalang siljish deformatsiyasini hisobga oladi. Bundan tashqari, an’anaviy usullardan voz kechgan holda silindrik qatlamning o‘rta sirti asosiy sirt

sifatida qabul qilinishi deformatsiyalanuvchi muhit bilan o‘zaro ta’sirlashuvchi doiraviy silindrik qatlamlar, qobiqlar va sterjnlarning dinamik masalalarida kinematik va dinamik shartlarni mavjud nazariyalarga nisbatan aniqroq shakllantirish imkonini beradi (J.N.Abdirazzoqov, D.Sh.Xoliqov).

Bu usulning yana bir afzalligi shundaki, tebranish tenglamalari bilan bir qatorda ko‘chishlar va kuchlanish maydonlari uchun analitik formulalarni olish mumkin, afsuski, S.P.Timoshenko tipidagi klassik yoki aniqlashtirilgan nazariya hollarida buni to‘liq amalga oshirib bo‘lmaydi. Mazkur yo‘nalishdagi ishlar (A.Abdirashidov, F.A.Amirqulova, Sh.M.Burkutboev) qovushoq siqiluvchi suyuqlik bilan o‘zaro ta’sirlashuvchi silindrik qovushoq elastik qobiq uchun taklif qilgan usulni ishlab chiqishga bag‘ishlangan.

Muhandislik amaliyotida qo‘llaniladigan, plastinka, sterjen kabi konstruksiya elementlarining uzluksiz muhit bilan, xususiyl hollarda ideal va qovushoq suyuqliklar bilan dinamik o‘zaro ta’sirining turli masalalari, bir qancha olimlarning ko‘plab maqolalari va umumiy ishlarida keltirilgan (X.Yajuan, S.Yunxuy, P.Panpan, Y.L.Chjan, J.M.Ris). Bu masalalar orasida turli xil suyuqliklarning qattiq jismlar bilan o‘zaro ta’siri eng to‘liq o‘rganilgan. Tadqiqotlar tahlili va ushbu muammoga bag‘ishlangan asarlarning sharhi maqolalar va monografiyalarda (K.J. Bathe, S. Lakovlev, X. Huang) keltirilgan.

Muhandislik amaliyotidagi masalalar uchun, hali yetarlicha o‘rganilmagan, qovushoq suyuqlik holatida yuqqa plitalar va qobiqlarning gidroelastiklik masalalariga qiziqish katta. Sferik va silindrik qobiqlarning qovushoq suyuqlik ta’siridagi nostatsionar deformatsiyasining maxsus holatlari bo‘yicha ba’zi natijalar K.N. Karagiozis, M.P. Paidoussis, M. Amabili, A. G. Shoh, T. Mahmud, M. N. Naim, S.H. Arshad, Ki Twinlarning ishlarida keltirilgan.. P.S.Kovalchuk, L.A.Kruk va S.N. Kukudjonova asarlarida suyuqlik bilan to‘ldirilgan silindrik qobiqlarning majburiy tebranishlari, shuningdek silindrik qobiqlarga yaqin bo‘lgan aylanma qobiqlarining tebranishlari va dinamik turg‘unligi, normal bosim va meridional kuchlar ta’sirida ko‘rib chiqilgan.

Bu yo‘nalishdagi fundamental natijalar R.P.Darmond, V.T.Ronlo va A.N.Guzlarga tegishli. Bu ishlar dissertatsiyada ko‘rsatilgan masalalar bilan bevosita bog‘liqdir. Hozirgi vaqtda aerogidroelastiklikning ko‘plab masalalari (statsionar masalalar uchun, statsionar va harakatlanuvchi suyuqliklar va gazlar uchun, chiziqli hamda nochiziqli masalalar va boshqalar) o‘rganilganligini ta’kidlab o‘tamiz. Bu tadqiqotlar natijalari ko‘p sonli nashrlarda o‘z aksini topgan (F. Alijani, M. Amabili). Bu ishlarda elastik jismlarning harakatini tavsiflashda Kirxgoff-Lyave, S.P.Timoshenko va boshqalarning gipotezalaridan foydalangan holda tuzilgan ikki o‘lchovli amaliy nazariyalar qabul qilingan va ba’zi hollarda dastlabki kuchlanishlarni hisobga olgan (V.D.Kubenko, A.V.Netrebko, S. G. Pshenichnov, A. N. Guz va boshqalar).

Ko‘plab nashrlarni o‘rganish bo‘yicha tadqiqotlarni sarhisob qilsak, qovushoq siqilgan suyuqlikni o‘z ichiga olgan qatlamli elastik va qovushoq elastik silindrik qobiqlar tebranishlarining matematik nazariyasi mavjud emasligini aytishimiz mumkin. Shuning uchun bu sohada yangi nazariyalar va hisoblash usullarini ishlab chiqish zarur. Ushbu dissertatsiya ishida yuqorida sanab o‘tilgan, hal qilinmagan

muammolarning bir qismi ya'ni, uch qatlamli silindrik qatlamlar, qobiqlar va sterjenlarni ularning ichidagi qovushoq siqiluvchi suyuqlik ta'sirini hisobga olgan holda hisoblashning yangi algoritmlari va usullarini ishlab chiqish orqali o'z yechimini topgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Qobiqlarning tebranishlari nazariyalarini turli xil gipoteza va soddalashtirishlarni qo'llab ishlab chiqishda ko'plab xorijiy olimlar katta hissa qo'shishgan. Jumladan H.Kirxgoff, A.Lyave, S.P.Timoshenko, V.V.Novojilov, R.M.Finkelshteyn, X.M.Mushtari, V.M.Darevskiy, E.I.Grigoliuk, S.A.Ambartsumyan, Yu.I.Yuan, U.K.Nigul, G.Germann, I.Mirskiy, V.Z.Vlasov, I.G.Filippov, J. Kudlička, J.O.Kim, H.Y.Chun, Xuebin Li² va boshqalar.

Konstruktiv qatlamli elementlar, xususan qatlamli va bir jinsli qobiq va plastinkalar dinamikasi hisobi bo'yicha Ularni ishlab chiqish hamda takomillashtirish bo'yicha ko'plab o'zbek olimlari samarali tadqiqotlar olib borishgan va borishmoqda. Ular qatoriga akademiklar T.Shirinqulov, T.Rashidov, M.Mirsaidov, professorlar K.Sultanov, X.Xudoynazarov, I.Safarov, M.Usarov, A.Axmedov, B.Mardonov, T.Mavlonov, R.Abdukarimov, K.Ismoilov, R.Abirov, I.Mirzayev va boshqalarni kiritish mumkin. Ushbu olimlarimiz va ularning ilmiy maktablari tomonidan olib borilayotgan ilmiy tadqiqotlar natijasida qobiqli konstruksiyalar samaradorligini oshirish va xalq xo'jaligi tarmoqlarida qo'llash bo'yicha vujudga keluvchi muammolarni hal qilishda salmoqli natijalarga erishilmoqda.

Shu bilan birga, shunday fakti ham tan olish kerakki, doiraviy silindrik bir jinsli, ko'p qatlamli va kompozit qobiqlarning tashqi dinamik yuklar, materialning qovushoq-elastiklik, plastiklik, anizotropiya va boshqa fizik-mexanik xususiyatlarini hamda ta'sirlashuvchi muhitlarning, xususan uchki va tashqi tinch yoki oquvchi qovushoq suyuqliklar ta'sirini hisobga oluvchi tebranish nazariyalarini yaxshi o'rganish, ularni rivojlantirish va aniqlashtirish hamda yangi matematik modellarini yaratish ishlari yetarli darajada emas.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Samarqand davlat universitetining "Deformatsiyalanuvchi muhit bilan o'zaro ta'sirlashuvchi diskret-uzluksiz tizimlarning turg'unligi va tebranishlarini tadqiq qilish" (2010-2025) mavzusidagi ilmiy-tadqiqot rejalariga muvofiq.

Tadqiqotning maqsadi dinamik yuklar ta'siridagi uch qatlamli silindrik qovushoq elastik qobiqlarning nostatsionar, o'qqa nisbatan simmetrik tebranishlarini dinamik hisoblashning matematik modellarini ishlab chiqish; uch qatlamli qobiqlarning ixtiyoriy kesimidagi nuqtalarida ko'chish va kuchlanish

² Dissertatsiya mavzusi bo'yicha xalqaro ilmiy tadqiqotlar sharhi quyidagi manbalar asosida amalga oshirildi: *F.Pellicano* Vibrations of circular cylindrical shells: theory and ex-periments // Journal of Sound and Vibration – 2007. 303. *A.S. Sayyad, Y.M. Ghugal* On the free vibration analysis of laminated composite and sandwich plates: A review of recent literature with some numerical results // Composite Structures 2015 129. *F. Alijani, M. Amabili.* Non-linear vibrations of shells: A literature review from 2003 to 2013 // International Journal of Non-Linear Me-chanics, Elsevier, 2014, 26. *H.T. Banks, S. Hu, and Zackary R. Ken.* A Brief Review of Elastic-ity and Viscoelasticity for Solids // Advances in Applied Mathematics and Mechanics Vol. 3, No.1 va boshqalar.

maydonlarini aniqlash algoritmlarini yaratish; ishlab chiqilgan modellarni uch qatlamli kompozit va bir jinsli silindrik qobiqlar va sterjlar tebranishining amaliy masalalarini yechish uchun qo‘llashdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

qovushoq siqiluvchan suyuqlik bilan o‘zaro ta’sirlashuvchi doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoq elastik qobiqning o‘qqa nisbatan simmetrik tebranishlari yangi matematik modelini yaratishdan iborat bo‘lib, u umumiy va aniqlashtirilgan tebranish tenglamalarini keltirib chiqarishni hamda qobiq tebranishlarining amaliy masalalarini qo‘yishni o‘z ichiga oladi;

doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoq elastik qobiqning ixtiyoriy ko‘ndalang kesimining istalgan nuqtasida kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini uning o‘qqa nisbatan simmetrik tebranishlari masalalari yecimlari orqali izlanuvchi funksiyalar maydonida bir qiymatli aniqlash imkonini beradigan algoritmi ishlab chiqish;

qovushoq suyuqlik bilan o‘zaro ta’sirlashuvchi, turli tashqi dinamik yuklar, xususiyl holda, zarbali va seysmik yuklar ta’siridagi doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoq elastik qobiqlarni dinamik hisoblashning yangi usulini yaratish;

taklif etilayotgan matematik model va ichida suyuqlik bo‘lgan uch qatlamli kompozit va bir jinsli silindrik qobiqlar tebranishining amaliy masalalari yechimlarini hisoblash usuli va qurilish, texnika va boshqa sohalarga oid dolzarb masalalarni yechishga qaratilgan.

Tadqiqot ob’ekti - uch qatlamli silindrik qovushoq elastik qobiqan iborat.

Tadqiqot predmeti –uch qatlamli silindrik qovushoq elastik va elastik qobiqlarning nostatsionar buralma va bo‘ylama-radial tebranishlari va tebranish jarayonlari.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqotni olib borish jarayonida matematik va sonli modellashtirish usullari, tutash muhitlar mexanikasining fundamental balans qonunlari va fenomenologik qonunlardan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

tashqi dinamik yuklar ta’siri ostidagi uch qatlamli doiraviy silindrik qovushoq- elastik qobiq buralma va bo‘ylama-radial tebranishlari dinamik hisobining, klassik va S.P.Timoshenko tipidagi modellarni o‘z ichiga olgan, yangi matematik modellari ishlab chiqilgan;

uch qatlamli qovushoq-elastik silindrik qobiqning ishlab chiqilgan nostatsionar tebranishlari tenglamalaridan, xususiyl hollarda, ikki qatlamli qobiqlar, uch qatlamli va bir jinsli sterjenlar tebranishlari tenglamalari kelib chiqishi isbotlangan;

doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoq-elastik qobiqning nostatsionar buralma va bo‘ylama-radial tebranishlarida qatlamlar ixtiyoriy kesimlari nuqtalaridagi kuchlangan-deformatsiyalangan holatini hisoblash algoritmi yaratilgan;

dinamik yuklar ta’siridagi doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoq-elastik qobiqning nostatsionar buralma va bo‘ylama-radial tebranishlari haqidagi amaliy ahamiyatli masalalar shakllantirilgan va mos hisoblash usuli ishlab chiqilgan;

ichidan o'zgarimas tezlik bilan qovushoq suyuqlik oqib o'tuvchi doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning bo'ylama tebranishlari tadqiq etilgan va o'rta qatlam qalinligining, materialining hamda qatlamlar joylashishining uch qatlamli qobiq doiraviy chastotasiga ta'sirini baholash metodikasi asoslangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

tashqi dinamik yuklar ta'siri ostidagi uch qatlamli doiraviy silindrik qovushoq- elastik qobiq buralma va bo'ylama-radial tebranishlari dinamik hisobining yangi matematik modellari;

nostatsionar buralma va bo'ylama-radial tebranishlari jarayonlaridagi uch qatlamli silindrik qovushoq-elastik va elastik qobiqlar kesimlaridagi ko'chish va kuchlanishlarning fazoviy va vaqt koordinatalariga bog'liq qonuniyatlarini aniq-lash bo'yicha olingan natijalar;

dinamik yuklar ta'siridagi doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoq-elastik qobiqning nostatsionar buralma va bo'ylama-radial tebranishlarida qatlamlar ixtiyoriy nuqtalarining kuchlangan-deformatsiyalangan holatini xarakterlovchi parametrlarning o'zgarish qonuniyatlari;

doiraviy silindrik uch qatlamli elastik va qovushoq-elastik qobiqlarning garmonik buralma va bo'ylama-radial tebranishlari masalalarini to'liq tarqalishi usuli bilan amaliy matematik paketlar yordamida sonli hisoblashga imkon beruvchi hisoblash algoritmi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi Furrye-Laplas integral almashrinishlarini qo'llash, darajali qatorlarga yoyish usullari va matematik fizikaning boshqa usullaridan foydalanib tebranish tenglamalarini chiqarishda qovushoq elastiklik nazariyasining tegishli masalalarini aniq echish usulidan foydalanish, shuningdek, boshqa mualliflarning natijalari bilan, xususiyl holda, bir jinsli doiraviy silindrik qobiq uchun olingan natijalar bilan, tizimli tekshirish orqali tasdiqlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati kompozit uch qatlamli silindrik qovushoq elastik qobiqlarning nostatsionar, buralma va bo'ylama-radial tebranishlari uchun tenglamalarni chiqarishning yangi usulini yaratish va takomillashtirish, tashqi dinamik, xususan, impulsli va seysmik yuklar ta'sirida bo'lgan kompozit qatlamli qobiqlarning tebranishlariga oid yangi amaliy masalalarni yechish hamda qobiqlar va boshqa tuzilmalarning konstruktiv elementlari, xususan, konussimon qobiqlar va cterjnlr, elliptik kesmadagi qobiq konstruktsiyalari, plitalar va boshqalar uchun ishlab chiqilgan usullarni umumlashtirish imkoniyati bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati tashqi dinamik yuklarni hisobga olgan holda uch qatlamli kompozit qobiqlarning buralma va bo'ylama-radial tebranishlarida kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holati parametrlarini aniqlashning amaliy masalalarini yechish uchun analitik-sonli algoritmlarni ishlab chiqish; materialining reologik, anizotrop va boshqa xossalarini hisobga olgan holda, matematik fizikaning shunga o'xshash masalalari uchun umumiy xarakterni ifodalaydigan, olingan natijalarni umumlashtirish imkoniyatlari bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Uch qatlamli kompozit qobiqlarning nostatsionar tebranishlarini sonli tahlil qilish uchun ishlab chiqilgan matematik modellar, hisoblash usullari va algoritmlar asosida quyidagilar amalga oshirildi:

Qovushoq siqiluvchi suyuqlikni o'z ichiga olgan kompozit uch qatlamli silindrik qobiq (quvur) nuqtalarida tashqi impulsli yuk tasirida yuzaga keladigan normal kuchlanishning kritik qiymatlarini hisoblash "YANGIOBOD BUNYODKOR QURILISH" MChJda loyihalashtirilgan quvurli uzatgichlarning ixtiyoriy kesimidagi nuqtalarida chidamlilik chegarasini aniqlashda amaliyotga joriy qilindi. Olingan natijalar (O'zbekiston Respublikasi Qurilish va uy-joy kommunal xizmat ko'rsatish vazirligining 2023-yil 18-avgustdagi 08-06/8138-sonli guvohnomasi) xarajatlarni normaga nisbatan 7 – 8 % ga kamaytirish imkonini bergan;

harakatlanuvchi qisqa muddatli yuklarning ta'siri natijasida uch qatlamli silindrik qobiq nuqtalarida paydo bo'ladigan radial kuchlanishlarning eng yuqori qiymatlarini aniqlash usuli "QISHLOQQURILISHLOYIHA" MchJ bosh loyiha qidiruv institutida joriy qilinganda ruxsat etilgan yuklarning bir jinsli silindrik qobiqlar uchun ruxsat etilgan yuklardan past ekanligini aniqlashga imkon berdi. Loyihalash jarayonida ushbu omilni hisobga olish (O'zbekiston Respublikasi Qurilish va uy-joy kommunal xizmat ko'rsatish vazirligining 2023-yil 18-avgustdagi 08-06/8138-sonli guvohnomasi) materiallar sarfini 9 % gacha tejash imkonini bergan;

"QISHLOQQURILISHLOYIHA" MchJ bosh loyiha qidiruv institutida qobiq materialining qatlamli kompozitlik xususiyatini hisobga olgan holda aniq hisob-kitobdan fqo'llanildi, bu zo'riqishlar va ko'cishlarni klassik nazariyaga ko'ra hisoblash real holatdan yuqori bo'lgan natijalar berishini aniqlashga imkon berdi. Ushbu faktni hisobga olish (O'zbekiston Respublikasi Qurilish va uy-joy kommunal xizmat ko'rsatish vazirligining 2023 yil 18 avgustdagi 08-06/8138-sonli guvohnomasi) materiallar sarfi va ishlab chiqarish xarajatlarini 7 – 9 % gacha tejash imkonini bergan;

kompozit uch qatlamli silindrik qobiqning ixtiyoriy kesimi nuqtalarining maksimal radial ko'chishini topish yo'li bilan konstruksiyning buzilishi mumkin bo'lgan nuqtalari va ularning qiymatlarini aniqlash "YANGIOBOD BUNYODKOR QURILISH" MChJda amaliyotga joriy qilindi. Bunday nuqtalarni halqali kamarlar yordamida mustahkamlash O'zbekiston Respublikasi Qurilish va uy-joy kommunal xizmat ko'rsatish vazirligining 2023-yil 18-avgustdagi 08-06/8138-sonli guvohnomasi) qobiqning yuk ko'tarish qobiliyatini 7% gacha ko'paytirish imkonini bergan;

ko'ndalang kesim bo'yicha qatlamlilikni hisobga olgan holda, statik va dinamik yuklarning birgalikdagi ta'siri ostidagi silindrik uch qatlamli qobiqning kesimlarida dinamik deformatsiyani hisoblashlar "AZIZ PROEKT PLAN" MChJ da loyihalash ishlarida amaliyotga joriy qilindi. Hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, olingan natijalar yengilroq va tejankor materiallardan foydalanishga imkon beradi (O'zbekiston Respublikasi Qurilish va uy-joy kommunal xizmat ko'rsatish vazirligining 2023-yil 18-avgustdagi 08-06/8138-sonli guvohnomasi) va shunga mos ravishda konstruksiyaning og'irligini 8% gacha kamaytirgan.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiyasi. Ushbu tadqiqot natijalari 5 ta xalqaro va 1 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 1 monografiya va 19 ta maqola O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarini (DSc) himoya qilish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan ilmiy jurnallar, respublika va xalqaro miqyosdagi konferensiyalar materiallarida, shu jumladan, SCOPUS ma'lumotlar bazasida indekslangan nashrlarda 8 ta (shundan 1 tasi WOS ma'lumotlar bazasida) va respublika ilmiy nashrlarida 9 ta maqola chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, beshta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 196 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirishda 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, muammolarning o'rganilganlik darajasi keltirilgan, tadqiqot maqsadi, vazifalarni, ob'ekti 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. Har bir bobning qisqacha mazmuni keltirilgan.

Dissertatsiya ishining birinchi bobi "Silindrik qatlam va qobiqlarning uzluksiz muhit bilan o'zaro nostatsionar ta'siri. Asosiy tenglamalar va ularni yechish usullari" deb nomlanib, elastik va qovushoq elastik jismlarning hamda silindrik qatlamlar, qobiqlar va sterjnlr kabi konstruksiya elementlarining deformatsiyalanuvchi muhit bilan, xususiy holda ideal va qovushoq suyuqliklar bilan o'zaro nostatsionar ta'siri muammolarini o'rganishga bag'ishlangan adabiyot manbalarini tahlil qilishga bag'ishlangan. Uch qatlamli silindrik qovushoq elastik qobiq va sterjnlarning nostatsionar tebranishlari, shuningdek, ularning qovushoq siqiluvchi suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'siri bo'yicha birqancha masalalar ham shakllantirilgan. Tadqiqot usuli tanlangan va dissertatsiya ishi doirasida amalga oshiriladigan keyingi tadqiqotlarning umumiy dasturi ishlab chiqilgan. Qovushoq elastik uch qatlamli qobiqlar va sterjnlr, shuningdek, qovushoq siqiluvchi suyuqliklarga nisbatan qo'llaniladigan gidroviskoelastiklikning asosiy tenglamalari va munosabatlari keltirilgan.

Bobning birinchi paragrafida konstruksiyaviy elementlarning deformatsiyalanuvchi muhit bilan nostatsionar ta'siri bo'yicha ilmiy tadqiqotlar haqida umumiy ma'lumotlar berilgan. Tabiatshunoslikning zamonaviy rivojlanishida, shuningdek, uning turli sohalari, muhandislik amaliyoti, shuningdek, yangi texnologiya va uskunalar tadqiqotchilar oldiga doimiy ravishda yangi nazariy va amaliy mexanikada kontaktli ta'sir masalalarni qo'yayotgani ta'kidlangan.

Masalalarning bu sinfiga materiallarning turli fizik-mexanik xossalari va ta'sirlashuvchi uzluksiz muhit ta'sirini hisobga olgan holda, ulardan yasalgan materiallar va konstruksiyalarning nostatsionar harakatlarini tavsiflovchi modellarni yaratish va takomillashtirish vazifalari ham kiradi. Bundan tashqari, masalalarning ushbu sinfiga yaratilgan va takomillashtirilgan modellar doirasida materiallarning dinamik deformatsiyasi va mustahkamlik xususiyatlarini o'rganish usullarini ishlab chiqish, shuningdek, atrofdagi yoki mavjud bo'lgan muhit bilan aloqa o'zaro ta'siri va dinamik tashqi yuklarning ta'siri ostida ishlashga yo'naltirish kiradi.

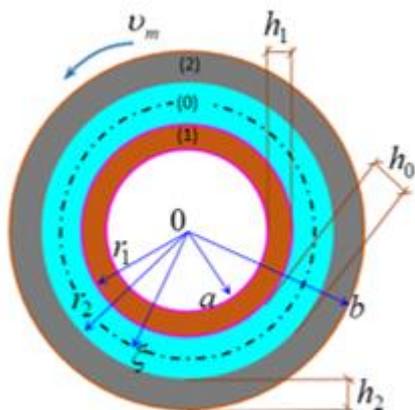
Ko'p sonli nashrlar ushbu masalalarni hal qilishga va deformatsiyalanuvchi qattiq jismlar mexanikasi ushbu klassik masalalarini o'rganishga bag'ishlangan. Dinamik masalalarini o'rganishning turli metodlari va deformatsiyalanuvchi qattiq jismlarning tutash muhit bilan o'zaro ta'siriga oid ba'zi boshqa masalalar, shuningdek fundamental nazariy va eksperimental masalalarning samarali matematik modellari I.G.Filippov va V.G.Cheban, I.Lottati, I.Elishakoff, H.Yajuan, W.Abassi va boshqalar, F.Pellicano, P.B.Gonsalves, A.S.Sayyad, Y.M.Ghugal, J.N.Reddi, S.V.Ivanova, L.I.Mogilevich, B.A.Xudayarov, V.M.Dubrovin, T.A.Butina, X.Xudoynazarov va uning shogirdlari, K.Sultonov, M.Mirsaidov, R.A.Abdikarimov, A.B.Axmedov va boshqalar tamonidan yaratilgan.

Qovushoq suyuqlik holatida yupqa plastinkalar va qobiqlar uchun gidroelastiklik masalalari katta qiziqish uyg'otadi, ular hali yetarlicha o'rganilmagan. Sferik va silindrik qobiqlarning qovushoq suyuqlikdagi turg'unligi deformatsiyasining maxsus holatlari bo'yicha ba'zi natijalar K.N.Karagiozis, M.P.Paidoussis, M.Amabili, A.G.Shah, T.Mahmood, M.N.Naeem, S.H.Arshad, Kyi asarlarida keltirilgan. To'liq suyuqlik bilan to'ldirilgan silindrik qobiqlarning majburiy tebranishlari, shuningdek silindrik qobiqlarga yaqin, normal bosim va meridional kuchlar ta'sirida aylanuvchi qobiqlarning tebranishlari va dinamik turg'unligi P.S.Kovalchuk, L.A.Kruk va S.N.Kukudjonovalarning ishlarida ko'rib chiqilgan. Bu yo'nalishdagi fundamental natijalar R.P.Darmond va V.T.Ronlo va A.N.Guzlarga tegishli. Bu ishlar dissertatsiyada ko'rsatilgan masalalar bilan bevosita bog'liqdir. Ta'kidlanishicha, hozirgi vaqtda aerogidroelastiklikning ko'plab masalalari o'rganilgan (statsionar masalalar uchun, statsionar va harakatlanuvchi suyuqliklar va gazlar uchun, chiziqli va nochiziqli shakllarda va boshqalar). Ushbu tadqiqotlar natijalari ko'plab nashrlarda aks ettirilgan. Bu ishlarda elastik jismlarning harakatini tavsiflashda ikki o'lchovli amaliy nazariyalar qabul qilingan, ular Kirxgoff-Love, S.P.Timoshenko va boshqalarning gipotezalaridan foydalangan holda, ayrim hollarda esa dastlabki kuchlanishlarni hisobga olgan holda tuzilgan.

Ko'pgina adabiy manbalarni o'rganish elastik doiraviy silindrik qatlam va qobiqlarning tebranishlari nazariyasi to'liq o'rganilmagan degan xulosaga kelishimizga imkon beradi. Bundan tashqari, agar qobiq yoki qatlam qovushoq, siqilmaydigan va siqiluvchan suyuqlik bilan nostatsionar ta'sirlashuv holatida bo'lsa, silindrik qatlam va qobiqlarning tebranishlarining taqribiy nazariyalari yer osti va suv osti inshootlari va kommunikatsiyalari uchun amalda mavjud emas, garchi ular hisoblash uchun bevosita ahamiyatga ega bo'lsa ham.

Ikkinchi paragrafda uch qatlamli silindrik qobiq va qovushoq siqiluvchan

suyuqlik harakatining asosiy tenglamalari keltirilgan. Silindrik koordinatalar sistemasida qovushoq-elastik materialdan yasalgan, qalinligi bo'yicha bir jinsli bo'lmagan uch qatlamli doiraviy silindrik qobiq qaralgan. Qobiqning dinamik yuklar ta'sirida ishlashi nuqtai nazaridan qobiqning ratsional konstruksiyasi bundan keyin yuk ko'taruvchi qatlamlar deb ataladigan ikki qatlam shaklida qattiq materialning asosiy yupqa devor yoki uchinchi qatlam yordamida ma'lum masofada ushlab turiladi deb hisoblanadi. Uchinchi qatlam bundan buyon to'ldiruvchi deb ataladi. To'ldiruvchi qatlam yuk ko'taruvchi qatlamlarni o'z qalinligiga teng masofada ushlab turadi va birgalikda ishlaydi.



1-rasm. Uch qatlamli silindrik qobiqning ko'ndalang kesimi

Koordinata sistemasining Oz o'qi qobiqning simmetriya o'qi bo'ylab yo'naltirilgan va qatlamlar 1a-rasmda ko'rsatilgandek raqamlangan: a va b - qobiqning ichki va tashqi radiuslari, r_1 va r_2 - o'rta (to'ldiruvchi) qatlamning ichki va tashqi radiuslari. Tebranish tenglamalarini olishda silindrik qobiq ham, yuk ko'taruvchi qatlamlar ham, to'ldiruvchi ham qovushoqlik matematik nazariyasiga qat'iy rioya qiladi va chiziqli formulada uning uch o'lchovli tenglamalari bilan aniq tasvirlanadi deb qaraladi. Doiraviy silindrik uch qatlamli qobiq qatlamlari nuqtalaridagi kuchlanish va deformatsiya komponentlari o'rtasidagi bog'lanishlar quyidagi shaklda berilgan deb hisoblanadi.

$$\begin{aligned} \sigma_{ii}^{(m)}(r, \theta, z, t) &= R_{\lambda m}(\varepsilon_{ii}^{(m)}) + 2R_{\mu m}(\varepsilon_{ii}^{(m)}); \\ \tau_{ij}^{(m)}(r, \theta, z, t) &= 2R_{\mu m}(\gamma_{ij}^{(m)}); \quad (i \neq j); \quad (i, j = r, \theta, z), \end{aligned} \quad (1)$$

bu yerda $\sigma_{ii}^{(m)}$ - va $\tau_{ij}^{(m)}$ - kuchlanish tenzorining normal va urinma komponentalari ($m=0,1,2$); $\varepsilon_{ii}^{(m)}$ - va $\gamma_{ij}^{(m)}$ - deformatsiya tenzorining normal va burchak komponentalari, $\varepsilon^{(m)}$ - hajmiy deformatsiya; $R_{\lambda m}$, $R_{\mu m}$ - qovushoq-elastik operatorlar quyidagiga teng.

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

λ_m , μ_m - qatlam materiali uchun Lamé koeffitsiyenti, $K_{\lambda m}(\tau)$ va $K_{\mu m}(\tau)$ - integral yadro operatori. $R_{\lambda m}$ va $R_{\mu m}$ teskarilanuvchan qovushoq-elastik operatorlari deb faraz qilinadi, $K_{\lambda m}(\tau)$ va $K_{\mu m}(\tau)$ lar ularning ixtiyoriy yadrolari.

(r, θ, z) silindrik koordinatalar sistemasida qobiq qatlamlari nuqtalarining harakat tenglamalari, silindrik uch o'lchovli jism sifatida, hajmiy kuchlar bo'lmaganda, bo'ylama - $\varphi^{(m)}$ va ko'ndalang - $\vec{\phi}_m$ to'lqinlarning potentsiallari bo'yicha to'lqin tenglamalariga qisqartiriladi

$$R_m(\Delta \varphi^{(m)}) = \rho_m \ddot{\phi}_m; \quad R_{\mu m}(\Delta \vec{\phi}_m) = \rho_m \ddot{\vec{\phi}}_m; \quad R_m = R_{\lambda m} + 2R_{\mu m}, \quad (3)$$

bu erda ρ_m - qatlam materiallarining zichligi; Δ - uch o'lchovli Laplas operatori

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (4)$$

Bunda qatlamlar nuqtalaridagi ko'chish vektori va kuchlanish tenzorining barcha komponentlari potensial funksiyalar orqali ifodalanadi. Xuddi shunday, o'zaro ta'sir qiluvchi qovushoq suyuqlikning harakat tenglamalari G va χ_1, χ_2 potensial funksiyalariga nisbatan qabul qilinadi.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(1 + \frac{4\nu'}{3a_0^2} \right) \Delta - \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] G = 0, \quad \left(\frac{\partial}{\partial t} - \nu' \Delta \right) \zeta_1 = 0, \quad \left(\frac{\partial}{\partial t} - \nu' \Delta \right) \zeta_2 = 0, \quad (5)$$

bu yerda a_0 - tinch holatdagi suyuqlikda tovush tezligi; ν' - kinematik qovushoqlik koeffitsiyenti. Bu yerda ham suyuqlik zarrachalarining kuchlanish tenzori va tezlik vektorining barcha komponentlari G va ζ_1, ζ_2 potensial funksiyalar orqali ifodalanadi.

Uchinchi paragrafda silindrik uch qatlamli qobiqning nostatsionar tebranishlari va uning qovushoq siqiluvchan suyuqlik bilan o'zaro ta'siri masalalari keltirilgan. Chegara shartlariga ko'ra, suyuqlikni o'z ichiga olgan silindrik qatlamning nostatsionar tebranishiga oid uch xil masala bo'lishi mumkin. Bularga qatlamning buralma, bo'ylama-radial va ko'ndalang tebranishlari kiradi. Shuning uchun, ushbu paragraf doirasida "silindrik qatlam - suyuqlik" gidroelastik sistemaning ko'ndalang, bo'ylama-radial va buralma tebranishlari bo'yicha masalalar ishlab chiqilgan.

$t < 0$ da qobiq tinch holatda deb faraz qilamiz, $t = 0$ paytda esa uning chegara sirtlariga u yoki bu turdagi tebranishlarni keltirib chiqaradigan kuchlanishlar ta'sir qiladi. Uch qatlamli qobiqning burilish tebranishlari uchun chegara shartlari quyidagi ko'rinishga ega.

$$\begin{cases} \tau_{r\theta}^{(1)}(a, z, t) = F_{r\theta}^{(1)}(z, t), & \text{npu } r = a, \\ \tau_{r\theta}^{(2)}(b, z, t) = F_{r\theta}^{(2)}(z, t), & \text{npu } r = b. \end{cases} \quad (6)$$

bu yerda $F_{r\theta}^{(i)}(z, t)$, ($i = 1, 2$) tashqi ta'sirlarning funksiyalari. Bundan tashqari, qatlamlar orasidagi chegara sirtlarida kontakt shartlariga ko'ra, ko'chishlar va kuchlanishlarning tengligi shartlari bajarilishi kerak, ya'ni.

$$\begin{cases} v_0(r_1, z, t) = v_1(r_1, z, t), \quad \tau_{r\theta}^{(0)}(r_1, z, t) = \tau_{r\theta}^{(1)}(r_1, z, t), & \text{npu } r = r_1, \\ v_0(r_2, z, t) = v_2(r_2, z, t), \quad \tau_{r\theta}^{(0)}(r_2, z, t) = \tau_{r\theta}^{(2)}(r_2, z, t), & \text{npu } r = r_2. \end{cases} \quad (7)$$

Masalaning boshlang'ich shartlari nolga teng deb hisoblanadi.

Qobiqning buralma tebranishlari simmetrik masaladir. Bu holda doiraviy silindrik qovushoq-elastik uch qatlamli qobiqning harakat tenglamalari quyidagicha bo'ladi.

$$R_{\mu m}(\Delta_0 \psi_m) = p_m \frac{\partial^2 \psi_m}{\partial t^2}; \quad \Delta_0 = \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2}, \quad m = \begin{cases} 1, & \text{если } a \leq r \leq r_1, \\ 0, & \text{если } r_1 \leq r \leq r_2, \\ 2, & \text{если } r_2 \leq r \leq b. \end{cases} \quad (8)$$

Shunday qilib, uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlari masalasi (8) integral tenglamalarni (6) chegaraviy, (7) kontakt, shuningdek, $t = 0$ da quyidagi boshlang'ich shartlar bilan yechiladi:

$$\psi_m = \frac{\partial \psi_m}{\partial t} = 0, \quad (m = 0, 1, 2).$$

Bo'ylama-radial tebranishlar uchun chegaraviy shartlar

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^{(1)}(a, z, t) = F_r^{(1)}(z, t), & \tau_{rz}^{(1)}(a, z, t) = F_{rz}^{(1)}(z, t), & \text{npu } r = a, \\ \sigma_{rr}^{(2)}(b, z, t) = F_r^{(2)}(z, t), & \tau_{rz}^{(2)}(b, z, t) = F_{rz}^{(2)}(z, t), & \text{npu } r = b. \end{cases} \quad (9)$$

ko'rinishga ega va kontakt sirtlarda quyidagi shartlar o'rinli

$$\begin{cases} w_0(r_1, z, t) = w_1(r_1, z, t), u_0(r_1, z, t) = u_1(r_1, z, t), \tau_{rz}^{(0)}(r_1, z, t) = \tau_{rz}^{(1)}(r_1, z, t), & r = r_1, \\ w_0(r_2, z, t) = w_2(r_2, z, t), u_0(r_2, z, t) = u_2(r_2, z, t), \tau_{rz}^{(0)}(r_2, z, t) = \tau_{rz}^{(2)}(r_2, z, t), & r = r_2. \end{cases} \quad (10)$$

Masalaning boshlang'ich shartlari, yuqoridagi kabi, nolga teng deb hisoblanadi. Bunday holda, harakat tenglamalari quyidagicha bo'ladi.

$$\left\{ R_m(\Delta_0 \varphi_m) = \rho_m \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial t^2}, R_{\mu m}(\Delta_0 \chi_m) = \rho_m \frac{\partial^2 \chi_m}{\partial t^2}, R_m = R_{\lambda m} + 2R_{\mu m}, (m = 0, 1, 2), a \leq r \leq b. \right. \quad (11)$$

Qolgan chegaraviy va kontakt shartlar dissertatsiyada ko'rib chiqilgan masalalar uchun xuddi shunday qo'yiladi.

Bobning to'rtinchi paragrafi qovushoq-elastik materialdan tayyorlangan uch qatlamli silindrik qobiqning nostatsionar tebranishlari masalalarini hal qilishning umumiy yechish metodini ishlab chiqishga bag'ishlangan. Bu usul keyingi bobda uch qatlamli doiraviy silindrik qovushoq-elastik qobiqning buralma tebranishlari uchun batafsil yoritilgan. U uch qatlamli qobiqning ichki va tashqi yuzalarida kuchlanishlar ko'rsatilgan chegara shartlarini taqribiy qanoatlantirishi uchun chiziqli qovushoqlik nazariyasining uch o'lchovli masalasini integral o'zgartirishlarda umumiy aniq yechimlardan foydalanishga asoslangan. Olingan umumiy yechimlar orqali qobiq nuqtalarining ko'chish vektori va kuchlanish tenzorining barcha komponentlari ifodalanadi. Ushbu usul, uning soddalashtirilgan versiyasida, uch qatlamli silindrik qovushoq-elastik qobiqning buralma tebranishlarining matematik modelini ishlab chiqish uchun, doiraviy silindrik qovushoq-elastik buralma tebranishlari nazariyasini ishlab chiqishga bag'ishlangan ikkinchi bob doirasida uch qatlamli qobiq keltirilgan.

Ikkinchi bobning birinchi paragrafida doiraviy silindrik qovushoq-elastik uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlari tenglamalari olingan. Doiraviy silindrik qovushoq-elastik qobiqning nostatsionar buralma tebranishlari uchun umumiy va ulardan taqribiy tenglamalarni chiqarishda yuqorida tuzilgan (6)-(8) boshlang'ich-chegaraviy masalani yechish kerak bo'ladi. Shu maqsadda tashqi ta'sir funksiyalari, chegara shartida (6) quyidagi shaklida ifodalanadigan funksiyalar sinfida ko'rib chiqiladi.

$$F_{r\theta}^{(i)}(z, t) = \int_0^\infty \frac{\sin kz}{-\cos kz} \left. \right\} dk \int_{(i)} f_{r\theta}^{(i)}(k, p) e^{pt} dp, \quad (i = 1, 2). \quad (12)$$

Bu yerda (l) ochiq kontur p kompleks sohada e'tiborga olmaslik darajadagi. $(-i\omega_0, i\omega_0)$ kichik o'q. Bundan tashqari, $F_{r\theta}^{(i)}(z, t)$ funksiyalar $f_{r\theta}^{(i)}(z, t)$, $(i = 1, 2)$ funksiyalari $\{0 < k < k_0, \text{Im}|p| < \omega_0\}$ sohadan tashqarida ahamiyatsiz bo'lgan deb

faraz qilinadi. (12) ga o'xshab, ψ_m potensial funksiyalarini quyidagicha ifodalaymiz.

$$\psi_m = \int_0^{\infty} \frac{\sin kz}{-\cos kz} \left. \right\} dk \int_{(l)} \tilde{\psi}_m e^{pt} dp, \quad (13)$$

Bundan tashqari, (13) tasvirlar, agar integral ostidagi funksiyalar yuqoridagi shartlar qanoatlantirsa, ψ_m funksiyalarni kerakli vaqtda ham fazoviy koordinatada, ham vaqt bo'yicha farqlash imkonini beradi.

So'ngra, (8) to'lqin tenglamalariga (13) almashtirishlarni qo'yib quyidagiga ega bo'lamiz

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \beta_m^2 \right) \tilde{\psi}_m = 0, \quad (m = 0, 1, 2), \quad (14)$$

bu yerda

$$\beta_m^2 = k^2 + \rho_m p^2 \tilde{R}_{\mu m}^{-1}; \quad \tilde{R}_{\mu m} = \mu_m [1 - \tilde{K}_{\mu m}(p)].$$

(14) tenglamalarning umumiy yechimlari quyidagi ko'rinishga ega

$$\tilde{\psi}_m(r) = B_m^{(1)} I_0(\beta_m r) + B_m^{(2)} K_0(\beta_m r); \quad (m = 0, 1, 2), \quad (15)$$

bu yerda $I_0(r)$, $K_0(r)$ - modifitsirlangan Bessel funksiyalari; $B_m^{(1)}$, $B_m^{(2)}$ - chegaraviy shartlardan aniqlanadigan integral o'zgarmlari; ρ_m - qatlam materiallarining zichligi; μ_m -Lame koeffitsiyenti.

(12) bilan bir qatorda $\tau_{r\theta}$, kuchlanishlarni ifodalab, ularni (12) bilan birgalikda potensial funksiyalar (13) tasvirlari yordamida (6) chegara shartlariga almashtirib, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\left. \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\tilde{\psi}_1}{dr} \right|_{r=a} = \tilde{R}_{\mu 1}^{-1} [f_{r\theta}^{(1)}]; \quad \left. \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\tilde{\psi}_2}{dr} \right|_{r=b} = \tilde{R}_{\mu 2}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}]. \quad (16)$$

Xuddi shunday, (7) almashtirilgan kontakt shartlari quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\begin{cases} \frac{d}{dr} \tilde{\psi}_1 = \frac{d}{dr} \tilde{\psi}_0, \quad \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\psi_0}{dr} = \tilde{R}_{\mu 0}^{-1} \tilde{R}_{\mu 1} \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\psi_1}{dr}, \quad \text{npu } r = r_1, \\ \frac{d}{dr} \tilde{\psi}_0 = \frac{d}{dr} \tilde{\psi}_2, \quad \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\tilde{\psi}_0}{dr} = \tilde{R}_{\mu 0}^{-1} \tilde{R}_{\mu 2} \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\psi_2}{dr}, \quad \text{npu } r = r_2. \end{cases} \quad (17)$$

Barcha uchta qatlam uchun (15) umumiy yechimlar bir vaqtning o'zida $r \rightarrow 0$ va $r \rightarrow \infty$ da cheklangan yechimlarni hisobga olgan holda bir xil ko'rinishga ega. Bunday holda, birinchi qatlamning chegaralari a va r_1 , ya'ni $a \leq r \leq r_1$. U pastdan (ichkaridan) $r=a$ sirt bilan chegaralangan, u chegarada nolga yaqinlashishi mumkin, ya'ni $a \rightarrow 0$ lekin hech qanday tarzda qiymatdan oshib keta olmaydi, ya'ni cheksizlikka intila olmaydi. Shuning uchun, birinchi qatlam- $\varphi_1(r)$ ning potensial funksiyasiga umumiy yechim yozayotganda, biz faqat $r \rightarrow 0$ da uning cheklanganligini hisobga olish bilan cheklanishimiz mumkin. Bunga asoslanib, shakldagi birinchi qatlam uchun (15) umumiy yechimni quyidagicha qabul qilamiz

$$\tilde{\psi}_1(r) = AI_0(\beta_1 r), \quad (a \leq r \leq r_1). \quad (18)$$

Ikkinchi, tashqi qatlam uchun ham xuddi shunday fikr yuritib, (15) umumiy yechim quyidagi ko'rinishga ega ekanligini aniqlaymiz.

$$\tilde{\psi}_2(r) = CK_0(\beta_2 r), \quad (r_2 \leq r \leq b). \quad (19)$$

O'rta qatlam uchun biz (15) umumiy yechimni qabul qilamiz, ikkita tashqi qatlam bo'lmaganda yechim bir jinsli silindrik qatlam uchun ma'lum yechimga aylanishi kerak, ya'ni $r \rightarrow 0$ va $r \rightarrow \infty$ bilan cheklanganda.

$$\tilde{\psi}_0(r) = B_1 I_0(\beta_0 r) + B_2 K_0(\beta_0 r), \quad r_1 \leq r \leq r_2. \quad (20)$$

Shunday qilib, kontakt shartlardan aniqlanishi kerak bo'lgan integral o'zgarmlari soni ikkitaga kamayadi A va C ga.

Kontakt shartlaridan A va C konstantalarini aniqlab, ularni (19) yechim bilan birgalikda o'zgartirilgan chegara shartlariga almashtiramiz.

$$\begin{cases} -F_1(\beta_1, a, r_1) \beta_0^2 [I_2(\beta_0 r_1) B_1 + K_2(\beta_0 r_1) B_2] = \tilde{R}_{\mu 0}^{-1} [f_{r\theta}^{(1)}(k, p)], \\ -F_2(\beta_2, b, r_2) \beta_0^2 [I_2(\beta_0 r_2) B_1 + K_2(\beta_0 r_2) B_2] = \tilde{R}_{\mu 0}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}(k, p)]. \end{cases} \quad (21)$$

bu yerda

$$F_1(\beta_1, a, r_1) = \frac{I_0(\beta_1 a) - \frac{2}{\beta_1 a} I_1(\beta_1 a)}{I_2(\beta_1 r_1)}, \quad F_2(\beta_2, b, r_2) = \frac{K_0(\beta_2 b) + \frac{2}{\beta_1 b} K_1(\beta_2 b)}{K_2(\beta_2 r_2)}. \quad (22)$$

(13) yordamida almashtirilgan o'rta qatlamning $\tilde{v}_0(r, k, p)$ buralmaini (20) umumiy yechim orqali ifodalab, biz uning tarkibida mavjud bo'lgan $I_1(\beta_0 r)$ va $K_1(\beta_0 r)$ Bessel funksiyalarini $(\beta_0 r)$ argument bo'yicha darajali qatorga yoyib quyidagini olamiz:

$$\tilde{v}_0(r, k, p) = \frac{1}{r} B_0^{(2)} + \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ -B_0^{(1)} + B_0^{(2)} \left[\ln \frac{\beta_0 r}{2} - \frac{1}{2} (\psi(n+1) + \psi(n+2)) \right] \right\} \beta_0^{2n+2} \frac{(r/2)^{2n+1}}{n!(n+1)!}. \quad (23)$$

Quyidagi prof. X.Xudoynazarov $\xi \in [r_1, r_2]$ oraliqda radiusi (1-rasm) $\xi = \frac{r_1}{2} \left(\chi - \frac{r_1}{r_2} \right)$ deb aniqlanadigan uch qatlamli qobiqning o'rta qatlamining ba'zi oraliq yuzasi nuqtalarida ko'chish va kuchlanishning talab qilinadigan qiymatlari sifatida olaylik. E'tibor bering, doimiy χ qiymatlariga qarab, "oraliq" sirtning radiusi ξ qatlamlar orasidagi kontakt yuzalarining radiusi yoki qobiqning o'rta yuzasi bo'lishi mumkin. Keyinchalik, oraliq sirt nuqtalari uchun transformatsiyalarda quyidagi yangi funksiyalarni kiritamiz.

$$\tilde{v}_0^{(0)} = -\frac{1}{2} \beta_0^2 B_0, \quad \tilde{v}_0^{(1)} = \frac{1}{\xi} B_2, \quad \text{zade } B_0 = B_1 - B_2 \left[\ln \frac{\beta_0 \xi}{2} - \psi(1) - \frac{1}{2} \right]. \quad (24)$$

(22) Bessel funksiyalarining kombinatsiyasi uchun, ularning yaqinlashishini nolga va birinchi yaqinlashishlarga cheklab, biz olamiz

$$\begin{aligned}
F_1(\beta_1, a, r_1) &= \frac{a^2}{r_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - r_1^2}{12} \beta_1^2 + \frac{r_1^2 (a^2 - r_1^2)}{144} \beta_1^4 \right), \\
F_2(\beta_2, b, r_2) &= \frac{r_2^2}{b^2} \left[1 + \frac{r_2^2 - b^2}{4} \beta_2^2 + \frac{r_2^2 (r_2^2 - b^2)}{16} \beta_2^4 \right].
\end{aligned} \tag{25}$$

(21) tenglamalarda kvadrat qavs ichiga olingan ifodalarni daraja qatoriga yoyamiz. Buning uchun biz ularga kiritilgan Bessel funksiyalarining standart yoyilmalaridan foydalanamiz. Keyinchalik, hosil bo'lgan tenglamalarga (24) almashtirishni qo'llaymiz, bu esa (25) ni hisobga olgan holda quyidagi tenglamaga olib keladi.

$$\begin{cases}
\frac{a^2}{r_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - r_1^2}{12} \beta_1^2 + \frac{r_1^2 (a^2 - r_1^2)}{144} \beta_1^4 \right) \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(r_1/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} \beta_0^{2n+2} \tilde{v}_0^{(0)} + \right. \\
\left. + \xi \left[\frac{1}{2} \beta_0^2 - \frac{2}{r_1^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \eta_{2,n}(r_1) \frac{(r_1/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} \beta_0^{2n+4} \right] \tilde{v}_0^{(1)} \right\} = \tilde{R}_{\mu 1}^{-1} [f_{r\theta}^{(1)}(k, p)], \\
\frac{r_2^2}{b^2} \left[1 + \frac{r_2^2 - b^2}{4} \beta_2^2 + \frac{r_2^2 (r_2^2 - b^2)}{16} \beta_2^4 \right] \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(r_2/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} \beta_0^{2n+2} \tilde{v}_0^{(0)} + \right. \\
\left. + \xi \left[\frac{1}{2} \beta_0^2 - \frac{2}{r_2^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \eta_{2,n}(r_2) \frac{(r_2/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} \beta_0^{2n+4} \right] \tilde{v}_0^{(1)} \right\} = \tilde{R}_{\mu 2}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}(k, p)].
\end{cases} \tag{26}$$

Formular bo'yicha $v_0^{(0)}, v_0^{(1)}$ funksiya va λ_m^n operatorlarni kiritamiz

$$[v_0^{(0)}, v_0^{(1)}] = \int_0^{\infty} \frac{\sin kz}{-\cos kz} dk \int_{(\ell)} (\tilde{v}_0^{(0)}, \tilde{v}_0^{(1)}) e^{pt} dp, \quad \lambda_m^n(\zeta) = \int_0^{\infty} \frac{\sin kz}{-\cos kz} dk \int_{(\ell)} (\beta_m^{2n} \zeta) e^{pt} dp. \tag{27}$$

(27) ni e'tiborga olgan holda p va k lar bo'yicha (26) shartlardan quyidagilarni olamiz

$$\begin{cases}
\frac{a^2}{r_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - r_1^2}{12} \lambda_1 + \frac{r_1^2 (a^2 - r_1^2)}{144} \lambda_1^2 \right) [C_{11}(r_1) v_0^{(0)} + \xi C_{21}(r_1) v_0^{(1)}] = R_{\mu 1}^{-1} [F_{r\theta}^{(1)}(z, t)], \\
\frac{r_2^2}{b^2} \left[1 + \frac{r_2^2 - b^2}{4} \lambda_2 + \frac{r_2^2 (r_2^2 - b^2)}{16} \lambda_2^2 \right] [C_{12}(r_2) v_0^{(0)} + \xi C_{22}(r_2) v_0^{(1)}] = R_{\mu 2}^{-1} [F_{2\theta}^{(2)}(z, t)].
\end{cases} \tag{28}$$

bu yerda

$$C_{1i}(r_i) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_0^{n+1} \frac{(r_i/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!}; \quad C_{2i}(r_i) = \frac{1}{2} \lambda_0 - \frac{2}{r_i^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \eta_2(n, r_i) \lambda_0^{n+2} \frac{(r_i/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!}. \tag{29}$$

(14) ifodalarga asoslanib, teskari o'tish paytida β_m ($m=0,1,2$) uchun (27) formulalar bilan kiritilgan λ_m^n operatorlari z, t o'zgaruvchilarida quyidagi ko'rinishga ega ekanligini aniqlash oson.

$$\lambda_m^n(\zeta) = \left[\rho_m R_{\mu m}^{-1} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \right) - \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \right]^n, \quad m = 0,1,2; \quad n = 1,2,3,\dots \tag{30}$$

bu yerda $R_{\mu m}$ - qatlam materiallari qovushoq-elastik operatorlari.

λ_m^n ($m=0,1,2; n=1,2,3,\dots$) operatorlari uchun (30) formulalarga muvofiq (28) tenglamalar cheksiz tartibli integrodifferensial tenglamalardir. Ushbu tenglamalar

uch qatlamli silindrik qobiq o'rtqa qatlami "oraliq" sirti nuqtalarining v_0 buralma ko'chishlari $v_0^{(0)}$ va $v_0^{(1)}$ bosh qismlarini o'z ichiga oladi. Ushbu "oraliq" sirt radiusga ega, uning qiymatlari $r_1 \leq \xi \leq r_2$ intervalda. ξ radiusning sonli qiymatiga ko'ra, bu "oraliq" sirti qobiqning o'rtqa va kontakt sirtlariga o'tishi mumkin. Shuning uchun, (28) tenglamalar ξ , radius qiymatiga qarab, uch qatlamli silindrik qovushoq-elastik qobiqning o'rtqa qatlami o'rtqa yoki kontakt sirtlari nuqtalari buralma ko'chishlarining asosiy qismlariga nisbatan tebranish tenglamalari bo'lishi mumkin..

Ikkinchi bobning ikkinchi paragrafida qobiqning ixtiyoriy nuqtasining kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini hisoblash algoritmi ishlab chiqilgan bo'lib, u qobiqning barcha uchta qatlami nuqtalari v_m ko'chishlarini va $\tau_{r\theta}^{(m)}$ va $\tau_{z\theta}^{(m)}$ kuchlanishlarini aniqlashni o'z ichiga oladi. Buning uchun barcha ko'chishlar va kuchlanishlarni qobiq o'rtqa qatlami v_0 buralma ko'chishining $v_0^{(0)}$, $v_0^{(1)}$ bosh qismlari orqali ifodalash kerak bo'ladi. Boshida, o'rtqa qatlamning nuqtalarining v_0 ko'chishi va $\tau_{r\theta}^{(0)}$ va $\tau_{z\theta}^{(0)}$ kuchlanishlari aniqlanadi. v_0 ni topish uchun (24) ni (23) ga qo'yamiz, so'ngra (27) yordamida \tilde{v}_0 ni p va k ga o'zgartiramiz. Ushbu protsedurani bajarib, quyidagiga ega bo'lamiz.

$$v_0(r, z, t) = C_1 v_0^{(0)} + \xi C_2 v_0^{(1)}, \quad (31)$$

bu yerda

$$C_1 = C_{1i} \Big|_{r_i=r}, \quad C_2 = C_{2i} \Big|_{r_i=r}.$$

(28) tenglamalar sistemasini yechish natijalariga ko'ra, ya'ni topilgan $v_0^{(0)}$ va $v_0^{(1)}$ qiymatlaridan foydalanib, r radial koordinatasi bo'yicha kerakli aniqlikdagi (31) formulalar yordamida istalgan vaqtda o'rtqa qatlamning ixtiyoriy kesimi nuqtasi $v_0(r, z, t)$ ko'chishini hisoblash mumkin. Shunga o'xshash formulalar barcha uchta qatlamning barcha kuchlanishlari va ko'chishlari uchun olingan. Masalan,

$$\tau_{r\theta}^{(2)} = \frac{r_2^2}{r^2} R_{\mu 0} \left\{ \left[1 + \frac{r_2^2 - r^2}{4} \lambda_2 \right] \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_0^{n+1} \left[2v_0^{(0)} + \xi \eta_{2,n}(r_2) \lambda_0 v_0^{(1)} \right] \frac{(r_2/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} + \xi \left(\frac{1}{2} \lambda_0 - \frac{2}{r_2^2} \right) v_0^{(1)} \right\} \right\}.$$

Shunday qilib, buralma tebranishlar paytida nolga teng bo'lmagan, qatlamlarning ko'chish vektorlari va kuchlanish tenzorlarining barcha komponentlari qobiqning o'rtqa qatlami v_0 buralma ko'chishining $v_0^{(0)}$ va $v_0^{(1)}$ asosiy qismlari orqali ifodalanadi. Ular uch qatlamli qobiqning ixtiyoriy kesimining kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini r , z va t vaqt koordinatalarida kerakli aniqlikda aniqlash imkonini beradi.

Ikkinchi bobning uchinchi paragrafida birinchi va ikkinchi paragraflarda olingan uch qatlamli silindrik qovushoq-elastik qobiqning buralma tebranishlari tenglamalarining natijalari va cheklovchi holatlari tahlili amalga oshiriladi. Xususan, quyidagilar olingan: ikki qatlamli qovushoq-elastik qobiqning buralma tebranish tenglamalari; yupqa to'ldiruvchili uch qatlamli silindrik qobiqning buralma tebranishlari umumiy tenglamalari; uch qatlamli elastik qobiqning buralma tebranish tenglamalari; bir jinsli qovushoq-elastik qobiqning buralma tebranish

tenglamalari; qovushoq-elastik sterjenning buralma tebranish tenglamalari va boshqalar.

Ikkinchi bobning to'rtinchi paragrafida doiraviy silindrik qovushoq-elastik uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlari ba'zi taqribiy tenglamalari keltirilgan. (28) tenglamalar o'rta qatlamning oraliq sirtida nuqtalarning buralma ko'chishining asosiy qismlariga nisbatan doiraviy silindrik qovushoq-elastik uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlarining umumiy tenglamalari. Bu tenglamalarda koordinata z va t vaqtga nisbatan cheksiz yuqori tartibli hosilalar mavjud.

Bundan tashqari, ularning o'ng tomonlari qobiq sirtlariga qo'llaniladigan tashqi kuchlarni to'g'ri hisobga oladi. Agar qovushoq-elastik operatorlar $R_{\mu 0}, R_{\mu 1}, R_{\mu 2}$ mos keladigan qovushoq muhit uchun ma'lum bo'lsa, (28) tenglamalar ularga bog'liqliklarning to'g'ri aks etishi bilan tavsiflanadi. (28) tenglamalar hosilalarda cheksiz yuqori tartibdaligi tufayli uch qatlamli qobiqlar dinamikasining amaliy masalalarini yechishda foydalanish uchun mos emas. Ulardan muhandislik hisoblarida foydalanish ham qiyin. Bundan kelib chiqadiki, (28) tenglamalar sistemasidagi tenglamalar tartibini cheklash kerak, ya'ni. ularning tarkibiga kiritilgan cheksiz yig'indilarda nolinci ($n=0$), birinchi ($n=1$), ikkinchi ($n=2$) va hokazo yaqinlashishlar olinadi. Shunday qilib, (2.1.48) tenglamalarda nolga yaqinlashish bilan cheklanib, biz quyidagi tenglamalar sistemasini oldik.

$$\begin{aligned} & \frac{a^2}{r_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - r_1^2}{12} \lambda_1 + \frac{r_1^2 (a^2 - r_1^2)}{144} \lambda_1^2 \right) \times \\ & \times \left[\frac{r_1^2}{4} \lambda_0 v_0^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} (\lambda_0 - \frac{4}{r_1^2}) + \frac{r_1^2}{8} (\ln \frac{r_1}{\xi} - \frac{1}{4}) \lambda_0^2 \right) v_0^{(1)} \right] = R_{\mu 1}^{-1} [F_{r\theta}^{(1)}(z, t)], \\ & \frac{r_2^2}{b^2} \left[1 + \frac{r_2^2 - b^2}{4} \lambda_2 + \frac{r_2^2 (r_2^2 - b^2)}{16} \lambda_2^2 \right] \times \\ & \times \left[\frac{r_2^2}{4} \lambda_0 v_0^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} (\lambda_0 - \frac{4}{r_2^2}) + \frac{r_2^2}{8} (\ln \frac{r_2}{\xi} - \frac{1}{4}) \lambda_0^2 \right) v_0^{(1)} \right] = R_{\mu 2}^{-1} [F_{r\theta}^{(2)}(z, t)]. \end{aligned}$$

Bu tenglamalardan ko'rinib turibdiki, integro-differensial operator λ_0 hosilalarda ikkinchi tartibli. Binobarin, λ_0^2 operatorining chiziqiligi tufayli u koordinata, vaqt va to'rtinchi tartibli aralash hosila bo'yicha to'rtinchi hosilalarni o'z ichiga oladi, ya'ni.

$$\lambda_0^2(\zeta) = \frac{1}{b_0^4} R_{\mu 0}^{-2} \left(\frac{\partial^4 \zeta}{\partial t^4} \right) - 2 \frac{1}{b_0^2} R_{\mu 0}^{-1} \left(\frac{\partial^4 \zeta}{\partial t^2 \partial z^2} \right) + \frac{\partial^4 \zeta}{\partial z^4}.$$

λ_1^2 va λ_2^2 operatorlari o'xshash tuzilishga ega.

Xuddi shunday, doiraviy silindrik qovushoq-elastik va elastik uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlari uchun boshqa taqribiy tenglamalar olinishi mumkin, bu bizni boshqa farazlar bilan cheklaydi. E'tibor bering, (28) tenglamalarning u yoki bu yaqinlashuvidan foydalangan holda qo'llaniladigan masalalarni hal qilishda chegara shartlarini to'g'ri shakllantirish uchun barcha qatlamlarning ko'chishlari va nolga teng bo'lmagan kuchlanish komponentlarini aniqlash formulalarida bir xil yaqinlashish bilan cheklanish kerak.

Dissertatsiya ishning uchinchi bobi qovushoq suyuqlik bilan o‘zaro ta’sirlashuvchi silindrik uch qatlamli va bir jinsli qobiqlardagi garmonik buralma tebranishlarni va to‘lqinlarini o‘rganishga bag‘ishlangan. Ilm-fan va texnikaning turli sohalarida, xususan, fizika va mexanikada tadqiqotchilar umumiy holatda to‘lqin harakati tahlilini eng oddiy garmonik to‘lqinlar tahliliga qisqartirishga harakat qilishadi. Bunday holda, teskari o‘tish, ya’ni, garmonik jarayonning xarakteristikasidan boshlang‘ich shartlar bilan ko‘rib chiqilayotgan jismdagi umumiy to‘lqin harakatini baholashga o‘tish sezilarli darajada qiyin. Shunga qaramay, elastik va qovushoq-elastik jismlardagi garmonik jarayonlarni o‘rganishga katta e’tibor beriladi. Tadqiqotchilarning bunday istagi masalani hal qilishning oraliq bosqichida tebranish sistemalarining faza va guruh tezligi, tabiiy chastotalar va rejim shakllari kabi xususiyatlari haqida muhim ma’lumotlarni olish mumkinligi bilan bog‘liq.

Ushbu bob doirasida ichki qovushoq suyuqlikning ta’sirini hisobga olgan holda bir jinsli silindrik qobiqning tabiiy buralma tebranishlari bo‘yicha masalalar ham hal qilinadi. Ushbu masalalarni hal qilishda muallifning oldingi ishlari natijalaridan qisman foydalangan holda oldingi bobda olingan tebranish tenglamalari ishlatilgan.

Uchinchi bobning birinchi paragrafida doiraviy silindrik elastik uch qatlamli qobiqda garmonik buralma to‘lqinlarning tarqalishi masalasi hal qilingan. Asosiy tebranish tenglamalari ikkinchi bobda nolga yaqinlashishda va maxsus elastik holatda olingan (28) tebranish tenglamalari hisoblanadi. Bunda qovushoq-elastik operatorlar quyidagi shaklini oladi.

$$R_{\mu_m} = \mu_m, \quad (m=0,1,2),$$

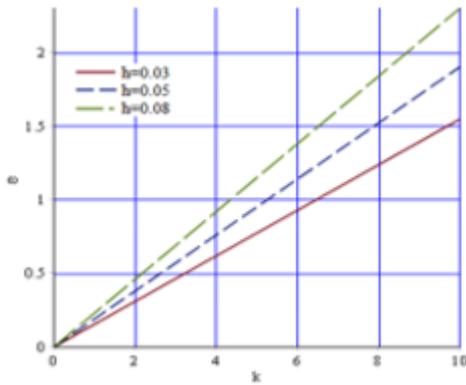
bu yerda μ_m ($m=0,1,2$) qatlam materiallarining siljish koeffitsiyentlari (Lyame koeffitsiyentlari). Keyin operatorlar (2.1.52) shaklni oladilar, ya’ni.

$$\lambda_m^n = \left[\frac{1}{b_m^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right]^n, \quad b_m^2 = \frac{\mu_m}{\rho_m}.$$

Bunday holda, $b_m = \left(\frac{\mu_m}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{2}}$, ($m=0,1,2$) - qatlamlar materiallarida ko‘ndalang to‘lqinlarning tarqalish tezligi. Olingan tenglamalarda o‘lchamsiz o‘zgaruvchilarga o‘tsak,

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 0,$$

chastota tenglamasi olinadi.

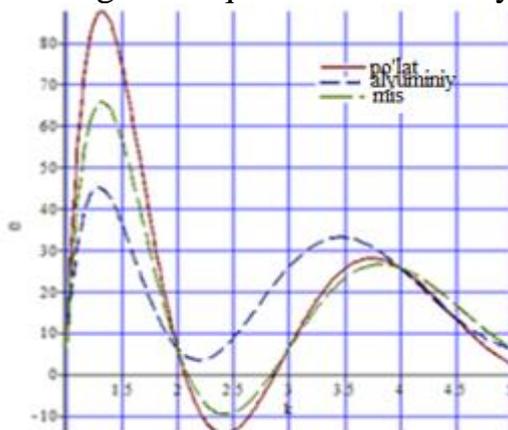


2-rasm. O'rta qatlamning turli qiymatlarda ω chastotaning k to'liqlar soniga bog'liqligi

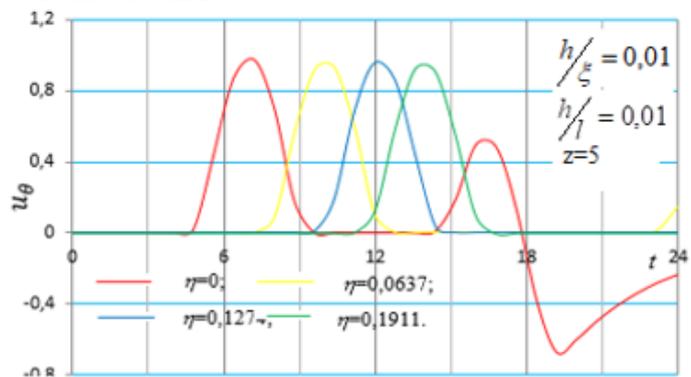
bu yerda A_{ij} sakkizinchi darajaga chastota ω va to'liq soni k ni o'z ichiga oladi va umuman chastota tenglamasi 14-chi kuchga ega. bu yerda kompozitsiya sakkizinchi darajaga qadar chastota va to'liq sonini o'z ichiga oladi va chastota tenglamasi umuman 14-chi darajaga ega. Bu tenglama Maple 17 amaliy dasturi yordamida yechilgan. Sonli hisob-kitoblar natijalari to'liq soniga bog'liq bo'lgan doiraviy tebranish chastotasining grafiklari ko'rinishida keltirilgan. 2-rasmda o'rta qatlam qalinligining turli qiymatlari uchun ω chastotaning k to'liq soniga bog'liqligi ko'rsatilgan. Hisob-kitoblar uchun yuk

ko'taruvchi qatlamlarning materiali sifatida fizik va mexanik parametrlari $\nu = 0.29$, $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ H/m}^2$ ga teng bo'lgan po'lat olingan. Qobiqning o'rta qatlami quyidagi elastik parametrlarga ega polimer hisoblanadi $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$, $E = 2 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2$, $\nu = 0.3$. Taqdim etilgan grafiklardan ma'lum bo'lishicha, to'liq sonining fiksirlangan qiymatlarida qalin o'rta qatlamli uch qatlamli qobiqning doiraviy tebranish chastotasi nozik o'rta qatlamli qobiqning doiraviy chastotasiga nisbatan yuqoriroqdir. Masalan, $k = 6$, to'liq sonida qalinligi $h = 0.08$ bo'lgan o'rta qatlamli qobiqning tebranish chastotasi o'rta qatlam qalinligi $h = 0.03$ bo'lgan qobiqning tebranish chastotasidan 49,17% yuqori bo'ladi.

Ushbu bobning ikkinchi paragrafida o'rta qatlami qovushoq elastik materialdan yasalgan doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqning garmonik buralma tebranishlari masalasi hal qilingan. Qovushoq elastiklik yadrosi sifatida biz quyidagi shakldagi o'rta qatlam uchun oddiy yadroni olamiz.



3-rasm. Tashqi qatlam turli xil bo'lganda uch qatlamli silindrik qobiq tebranish chastotasining to'liq soniga bog'liqligi



4-rasm. Kesimlarda η ning har xil qiymatlarida u_θ ko'chishining vaqtga bog'liqligi

$$K_0(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n}{\tau_n} e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n = 1,$$

bunda α_n - o'rta qatlamning qovushoq-elastik parametrlari, τ_n – relaksatsiya vaqti. Olingan natijalar tebranish chastotasining to'liq soniga nisbatan grafiklari ko'rinishida keltirilgan. 3-rasmda tashqi qatlamlarning turli xil materiallari (Po'lat, alyuminiy, mis) uchun uch qatlamli qobiqning tebranish chastotasining to'liq soniga bog'liqligi ko'rsatilgan. Bunday holda, o'rta qatlam EDM-6 qovushoq-elastik polimer materialidir. Chastotaning to'liq soniga nisbatan berilgan grafiklari shuni ko'rsatadiki, bir xil to'liq sonining qiymatlarida yuqori elastik modulli materialdan yasalgan tashqi qatlamli qobiqning tebranish chastotasi elastik moduli pastroq bo'lgan materialdan kattaroqdir. Tashqi qatlamlar materialining turidan qat'i nazar, uch qatlamli qobiqning tebranish chastotasi $0 \leq \kappa \leq 2$. to'liq sonlari oralig'ida eng yuqori qiymatlarga ega. Har uch holatda ham chastota o'zgarishi qonuni sinusoidalga yaqin bo'lib, κ soni ortib borishi bilan zaiflashuv bilan tavsiflanadi.

Uchinchi bobning uchinchi paragrafida qovushoq suyuqliklarning ichki va tashqi oqimlari bilan o'zaro ta'sir qiluvchi silindrik qobiqdagi buralma to'liqlarining tarqalishi masalasi qaralgan. Sonli hisob-kitoblar uchun qobiq materialini po'lat deb olingan, uning fizik-mexanik parametrlari quyidagicha: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0,25$, $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ H/m}^2$. Qobiqning o'lchamsiz uzunligi $l = 10$. $\eta = \rho'_1 / \rho$ - buzilgan suyuqlik zichligining qobiq zichligiga nisbati va hisob-kitoblarda biz faqat suyuqlikning zichligini o'zgartiramiz. Olingan natijalar ko'chish va kuchlanish grafiklari ko'rinishida keltirilgan. 4-rasmda suyuqlik zichligining turli qiymatlarida vaqt o'tishi bilan buralma ko'chishining o'zgarishi grafiklari ko'rsatilgan.

Dissertatsiyaning to'rtinchi bobi qobiqlarning klassik nazariyasida qabul qilingan farazlar va gipotezalardan foydalanmasdan ishlab chiqilgan doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoq-elastik qobiqning nostatsionar bo'ylama-radial tebranishlarining matematik nazariyasini ishlab chiqishga bag'ishlangan, yoki Timoshenko tipidagi takomillashtirilgan nazariyalarda, shuningdek, matematik yoki fizik xarakterda soddalashtiruvchi farazlarida. Bunday holda, qobiq qatlamlarining har birining materiallarining qovushoq harakatini tavsiflovchi qovushoq-elastik operatorlarning yadrolari o'zboshimchalik bilan hisoblanadi. Qobiqdagi tebranish jarayonini qo'zg'atuvchi tashqi kuchlar uyg'otuvchi deb hisoblanadi.

To'rtinchi bobning birinchi paragrafida qobiqning har bir qatlami uchun tuzilgan qovushoq elastiklikning chiziqli nazariyasining uch o'lchovli masalasining aniq yechimlariga asoslanib, doiraviy qatlamli qovushoq-elastik silindrik qobiq nostatsionar bo'ylama-radial tebranishlarning umumiy tenglamalari hosil bo'ladi, ular o'rta qatlamning ba'zi oraliq sirti nuqtalarining bo'ylama va radial ko'chishlarining asosiy qismlarini o'z ichiga oladi, ular ekstremal holatlarda qobiqning o'rta qatlamining ichki, tashqi yoki o'rta sirtiga kirishi mumkin. Formular kuchlanish tenzori va ko'chish vektorining nolga teng bo'lmagan barcha komponentlari uchun olingan bo'lib, ular qobiqning ixtiyoriy kesimining kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlashga imkon beradi, shunda

qatlamlar va qobiq materiallarining ba'zi mustahkamlik xarakteristikalarini shunday bir butunni analitik aniqlash mumkin bo'ladi. Qobiq va doiraviy silindrik tayoqning ko'ndalang tebranishlari uchun ba'zi taqribiy va aniqlangan tenglamalar berilgan. Cheklovchi va maxsus holatlar tahlil qilinadi.

Ikkinchi paragrafida qovushoq-elastik silindrik uch qatlamli qobiqning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlash algoritmi ishlab chiqilgan bo'lib, u asosiy qismlar orqali barcha uchta qatlamning berilgan nuqtalarida u_m, w_m ($m = 0, 1, 2$) va $\sigma_{rr}^{(m)}, \sigma_{zz}^{(m)}, \sigma_{\theta\theta}^{(m)}, \tau_{zr}^{(m)}$ kuchlanishlarni aniqlash uchun analitik formulalarni olishni o'z ichiga oladi. $u_{0,0}$ va $u_{0,1}$ - bo'ylama va $w_{0,0}, w_{0,1}$ - qobiqning oraliq yuzasi o'rta qatlami nuqtalarining radiusli ko'chishi. Olingan formula, masalan, o'rta qatlam nuqtalarini siljitish uchun quyidagi shakliga ega.

$$u_0(r, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \delta_0^n \cdot u_{0,0} + q_1^{(0)} \cdot Q_n^{(0)} \left(\frac{\partial \tilde{w}_{0,0}}{\partial z} - \delta_0 u_{0,0} \right) \right\} \frac{(r/2)^{2n}}{(n!)^2} - \\ - \xi \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \delta_0^n \cdot u_{0,1} + \lambda_0 q_2^{(0)} Q_n^{(0)} \left(\frac{\partial \tilde{w}_{0,1}}{\partial z} - u_{0,1} \right) \right\} \eta_{3,n}(r) \frac{(r/2)^{2n}}{(n!)^2},$$

Xuddi shunday, ikkinchi yuk ko'taruvchi qatlamning radial normal kuchlanishini aniqlash uchun formula olindi.

$$\left(\delta_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \sigma_{rr}^{(2)} = R_{\mu_2} \left\{ - \left[\left(\lambda_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + \delta_2 \left(2 + \frac{r^2}{r_2^2} \right) + \delta_2 \left(3\lambda_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \frac{r^2 - r_2^2}{8} \right] \frac{\partial u_0(r_2, z, t)}{\partial z} + \right. \\ \left. + \left[\lambda_2 \left(\lambda_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\lambda_2 + \delta_2) \frac{r^2 - r_2^2}{8} + \left(\lambda_2 - 3 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + \frac{r^2}{2r_2^2} \left(\delta_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \right] \frac{2}{r_2} w_0(r_2) \right\}.$$

Bunda $\lambda_m^n(\zeta)$ operatorlar (30) ko'rinishda, $\delta_m^n(\zeta)$ operatorlar esa quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\delta_m^n(\zeta) = \left[\rho_m R_m^{-1} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \right) - \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \right]^n, \quad m = 0, 1, 2; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Olingan formulalar fazoviy koordinatalar va vaqtdan foydalanib, kerakli aniqlik bilan uch qatlamli qobiqning ixtiyoriy kesimining kuchlanish-deformatsiya holatini aniqlash imkonini beradi.

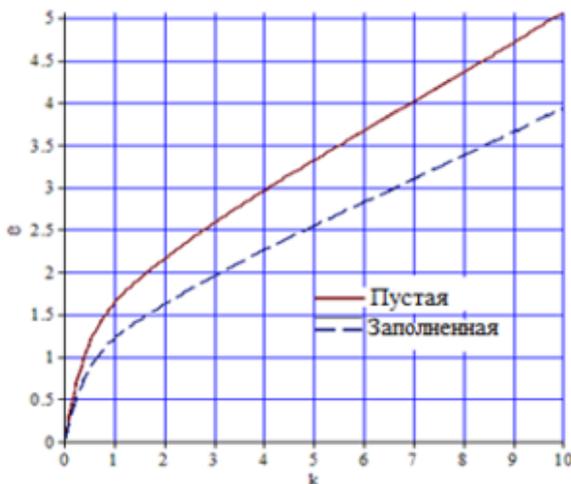
To'rtinchi bobning uchinchi paragrafida ushbu bobning birinchi paragrafida olingan doiraviy silindrik qovushoq-elastik uch qatlamli qobiqning bo'ylama-radial tebranishlari uchun ba'zi cheklovchi holatlar va tenglamalarning alohida turlari ko'rib chiqiladi. Quyidagilar olingan: 1) ikki qatlamli qovushoq-elastik qobiqning bo'ylama-radial tebranishlari tenglamalari; 2) bir jinsli qovushoq-elastik qobiqning bo'ylama-radial tebranishlari tenglamalari; 3) yupqa to'ldiruvchili uch qatlamli silindrik qobiqning bo'ylama-radial tebranishlarining umumiy tenglamalari; 4) qovushoq-elastik sterjenning bo'ylama-radial tebranishlari tenglamalari.

To'rtinchi paragrafida qovushoq-elastik silindrik uch qatlamli qobiqning bo'ylama-radial tebranishlari uchun taqribiy tenglamalarning bir nechta versiyalari keltirilgan. Qayd etilganidek, uch qatlamli qobiqning bo'ylama-radial tebranishlari uchun hosil bo'lgan tenglamalar, cheksiz yuqori tartibli hosilalarda, uch qatlamli

qobiqlar dinamikasining amaliy masalalarini hal qilishda foydalanish uchun mos emas. Ularni muhandislik hisoblarida qo'llash ham juda qiyin. Bundan kelib chiqadiki, hosil bo'lgan tenglamalar sistemasida tenglamalar tartibini cheklash kerak, ya'ni, ularning tuzilmalariga kiritilgan cheksiz yig'indilarda ($n=0$), nolinchi, ($n=1$), birinchi, $n=2$ ikkinchi va hokazo yaqinlashishlar. Prof. X. Xudoynazarov uch qatlamli qobiqning bo'ylama-radial tebranish tenglamalarining turlicha yaqinlashishlari tahlil qildi.

Dissertatsiya ishning beshinchi bobi qovushoq suyuqlik ta'sirini hisobga olgan holda bir jinsli silindrik qatlamlar va qobiqlarning statsionar (garmonik) va nostatsionar bo'ylama-radial tebranishlarini o'rganishga bag'ishlangan. Shuning uchun, birinchi navbatda, to'rtinchi bobda olingan uch qatlamli elastik qobiqning tebranish tenglamalarining maxsus holi sifatida bir jinsli elastik qobiqning tebranish tenglamalari olinadi. Keyin, bir jinsli elastik qobiq tebranishlarining hosil bo'lgan tenglamalariga qovushoq suyuqlikning reaksiyasini hisobga oladigan atamalar kiritiladi. Bunday gidroelastik sistemalarning garmonik va nostatsionar bo'ylama-radial tebranishlari bo'yicha amaliy masalalarni hal qilish uchun uning bo'shliqlaridagi qovushoq suyuqlikning ta'sirini hisobga olgan holda, shu tarzda olingan bir jinsli qobiqning tebranish tenglamalari ishlatilgan.

Beshinchi bobning birinchi paragrafida tinch holatda qovushoq siqilgan suyuqlikni o'z ichiga olgan doiraviy silindrik elastik qobiqning bo'ylama-radial tebranishlari masalasi ko'rib chiqiladi. Bir jinsli elastik qobiqning tebranish tenglamalari uning bo'shliqlaridagi qovushoq suyuqlikning ta'sirini hisobga olgan holda olinadi. Kerakli funksiyalarning qiymatlari yordamida kerakli funksiyalar maydoniga asoslangan holda ko'rib chiqilayotgan gidroelastik sistemaning ixtiyoriy kesimi nuqtalarining kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini bir qiymatli aniqlashga imkon beradigan algoritm taqdim etilgan. Olingan elastik qobiqning tebranish tenglamalari, uch qatlamli qovushoq-elastik qobiqning tebranish tenglamalarining maxsus holati sifatida, ilgari ma'lum bo'lgan shaxsiy natijalar bilan mos keladi.



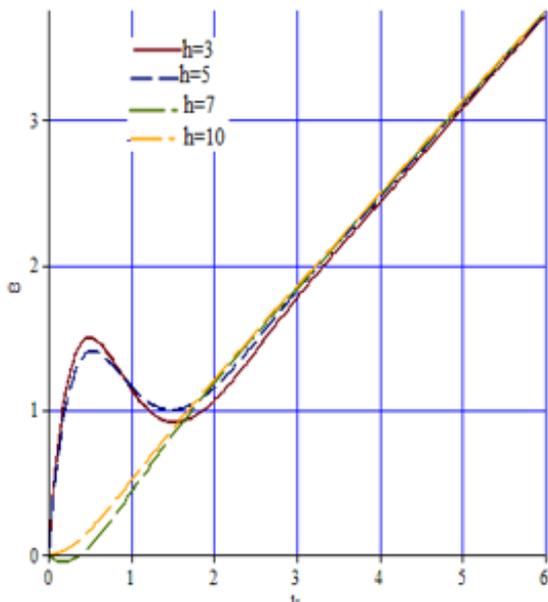
5-rasm. Ichi bo'sh va suyuqlik bilan to'ldirilgan po'lat qobiq uchun ω va k o'rtasidagi bog'lanish

Ikkinchi paragrafda, olingan tebranish tenglamalari asosida, qovushoq siqiluvchan suyuqlikni o'z ichiga olgan elastik silindrik qatlamda bo'ylama-radial garmonik to'lqinlarning tarqalishi o'rganiladi. Silindrik qatlamning qovushoq suyuqlik bilan harakatini tavsiflash uchun birinchi bo'limda olingan taqribiy tebranish tenglamalari qo'llaniladi. 5-rasmda suyuqlik bilan to'ldirilgan va to'ldirilmagan holatlar uchun $h=0,1$ qalinlikdagi po'lat qatlam uchun ω tebranish chastotasining k - to'lqin soniga bog'liqligi ko'rsatilgan.

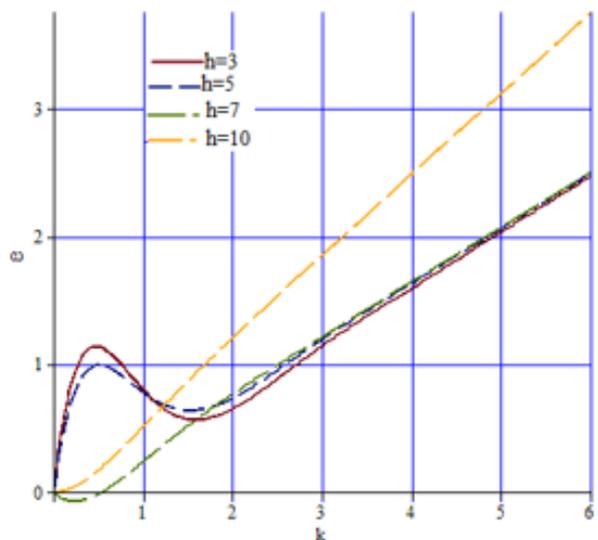
$k=8$ da suyuqlik bilan to'ldirilgan va to'ldirilmagan qatlamlar chastotalari orasidagi farq qobiq uchun 71,4% ga nisbatan 27,1% ni tashkil qiladi. Bundan kelib chiqadiki, suyuqlikning qobiq tebranish chastotasiga ta'siri qatlam tebranish chastotasiga nisbatan 1,9 marta kattaroqdir.

To'liq bo'lsa, u 28,6% ni tashkil qiladi. Bundan kelib chiqadiki, qovushoq suyuqlikning po'lat qobiqning tebranish chastotalariga ta'siri mis qobiq'ining tebranish chastotalariga qaraganda kattaroqdir. Boshqacha qilib aytganda, bu qattiq materialdan yasalgan qobiqning tebranish chastotalariga qovushoq suyuqlikning ta'siri yumshoqroq materialga ($\approx 26\%$) nisbatan bir necha marta ($\approx 70\%$) ko'proq ekanligini anglatadi.

Uchinchi paragrafda doiraviy silindrik elastik qobiqning ichida qovushoq suyuqlik o'zgarmas tezlik bilan oqqan holdagi garmonik bo'ylama tebranishlari masalasi yechilgan. Shu maqsadda (r, θ, z) silindrik koordinatalar sistemasida o'rta qatlamining ichki radiusi r_1 va tashqi radiusi r_2 bo'lgan ($r_1 < r_2$) doiraviy silindrik uch qatlamli qobiqni o'zgarmas v tezlikda oquvchi qovushoq suyuqlik bilan birgalikda qaraymiz. Qobiq qalinligi o'zgarmas bo'lib $h = r_2 - r_1$ ga teng. Asosiy tenglamalar sifatida doiraviy silindrik elastik qobiq bo'ylama-radial tebranishlarining umumiy tenglamalarini va 4.3-bo'limda $\lambda^n, \delta^n, n = 0, 1, 2, \dots$ integro-differensial operatorlar uchun keltirib chiqarilgan ifodalarni olamiz. Uch qatlamli qovushoq elastik qobiqning sof bo'ylama tebranishlari uchun radial normal kuchlanishlar nolga teng bo'lishi kerakligi hisobga olinadi. Bundan tashqari ushbu holda radial ko'chishlar nolga tenglashtirib olinadi. Buning uchun qobiq o'rta qatlamining ixtiyoriy nuqtasida ko'chishining radial komponentasi mavjud emas deb hisoblaymiz, ya'ni $w_0 = 0$.



6-rasm. Tashqi qatlamlar alyuminiy va o'rta qatlam polimer bo'lgan uchu qatlamli qobiq chastotalarining to'lqin soniga bog'liqligi (o'rta qatlam qalinligining turli qiymatlarida)



7-rasm. Tashqi qatlamlar mis va o'rta qatlam polimer bo'lgan uchu qatlamli qobiq chastotalarining to'lqin soniga bog'liqligi (o'rta qatlam qalinligining turli qiymatlarida)

Olingan sonli natijalar 14 ta rasmda keltirilgan bo'lib, ular asosida uch qatlamli qobiq ichida joylashgan uning xususiy tebranish chastotasiga ta'sirining ba'zi qonuniyatlari o'rnatiladi. 6-rasmda o'rta qatlamli qalinligi turlicha bo'lgan polimer va tashqi qatlamlari alyuminiydan iborat uch qatlamli qobiqning buralma tebranishlari chastotasi bilan to'liqlar soni o'rtasidagi bog'liqliklar keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, to'liqlar sonining kichik $k \leq 2$ qiymatlarida uch qatlamli qobiq o'rta qatlamli qalinligining oshishi bilan buralma tebranishlar chastotasining to'liqlar soniga bog'liqligi to'g'ri proporsional xarakterga ega bo'ladi.

Nisbatan yuqaroq o'rta $h \leq 5$ qatlamlarda, $k \leq 2$ qiymatlarda grafiklarda egilish paydo bo'ladi, bu o'rta qatlamli $h \leq 5$ o'lchamsiz qalinlikdagi polimer bo'lgan uch qatlamli qobiqlar yetarlicha uzun to'liqlik jarayonlarda boshqacha bo'lishini anglatadi (6-rasm, 7-rasm).

Bunday hollarda tebranish chastotasi birinchi navbatda keskin ortadi, so'ngra to'liqlar soni $k \approx 1,5$ ga yaqin qiymatlarida kamayadi, muvozanatlashadi hamda chastota va to'liqlar soni o'rtasidagi to'g'ri proporsionallik rejimiga o'tadi. $h \leq 7$ bo'lganda tashqi qatlamlari alyuminiy bo'lgan uch qatlamli qobiqning tebranish chastotasi tashqi qatlamlari mis bo'lgan uch qatlamli qobiqning tebranish chastotasidan ancha yuqori bo'ladi. Masalan, qalinligi $h = 7$ bo'lgan qobiq uchun bu munosabatlar 60 % ni tashkil qiladi.

Binobarin, qobiqning tashqi qatlamlari sifatida zichligi yuqori bo'lgan materiallardan (mis) foydalanish zichligi kamroq materiallardan (alyuminiy) tayyorlangan tashqi qatlamlarga nisbatan chastotaning pasayishiga olib keladi.

XULOSA

Dissertatsiya ishida ko'rib chiqilgan materialning qovushoq elastik xususiyatlarini va o'zaro ta'sirlashuvchi qovushoq suyuqlikni hisobga olgan holda uch qatlamli doiraviy silindrik qobiqlarda tebranish jarayonlarini o'rganish muammolari qovushoqlik chiziqli nazariyasining aniq uch o'lchamli masalalarini qo'yish va yechish asosida hal qilingan. Shu asosda:

1. Turli tashqi dinamik, xususiy holda, zarba va seysmik yuklar ta'siridagi qovushoq suyuqlik bilan o'zaro ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoqelastik qobiqlarni dinamik hisoblashning yangi usuli yaratildi;

2. Qovushoq siqiluvchan suyuqlik bilan o'zaro ta'sir qiluvchi doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoqelastik qobiqning buralma va bo'ylama-radial tebranishlarining yangi matematik nazariyalari yaratildi, bu nazariya uch qatlamli qobiqlar tebranishlarining umumiy va aniqlashtirilgan tenglamalarini hamda qobiq tebranishlari uchun amaliy masalalar qo'yishni o'z ichiga oladi;

3. Doiraviy silindrik uch qatlamli qovushoqelastik qobiq istalgan kesimining ixtiyoriy nuqtasida kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini izlanuvchi funktsiyalar sinfi bo'yicha uning buralma va bo'ylama-radial tebranishlariga oid tegishli masalalarni yechish natijalari asosida aniq topish imkonini beradigan algoritm ishlab chiqilgan;

4. Taklif etilgan matematik model va hisoblash usuli asosida ichida suyuqlik bo'lgan uch qatlamli kompozit va bir jinsli silindrik qobiqlar tebranishlarining amaliy masalalari yechilgan;

5. Doiraviy silindrik qovushoqelastik uch qatlamli qobiqning garmonik buralma tebranishlari masalasini yechish shuni ko'rsatdiki, uch qatlamli silindrik qovushoqelastik qobiq tebranishlarining taklif etilgan nazariyasi va tenglamalari tebranish chastotasi va to'lqin soni o'rtasidagi munosabatni bir qiymatli aniqlash imkonini beradi;

6. Qovushoq suyuqliklarning ichki va tashqi oqimlari bilan o'zaro ta'sirlashuvchi doiraviy silindrik qobiqdagi buralma to'lqinlarning tarqalishi masalasi chekli ayirmalar usuli asosida hal qilindi. Olingan yechim natijalari quyidagicha xulosalar chiqarishga imkon berdi:

Suyuqlik tezligi oshgani sayin, to'lqin tarqalish tezligini o'zgartirmasdan, buralma ko'chishining amplitudasi kamayadi. Bunday holda, tezlik ma'lum bir "kritik" qiymatga yetganda, tebranishlarning keskin o'zgarishi kuzatiladi. Suyuqlik tezligining oshishi bilan kuchlanishlar ham kamayadi, lekin suyuqlik tezligi qobiqning uchlarida yaqin bo'lgan kesimlarida "kritik" qiymatga yetganda, kuchlanish keskin ortadi;

7. Ichida o'zgarimas tezlik bilan oquvchi suyuqlik mavjud bo'lgan silindrik qobiqning bo'ylama tebranishlari o'rganildi:

- tinch holatdagi suyuqlikning mavjudligi ko'chish amplitudasining pasayishiga va to'lqinning kechikishiga olib keladi. Bo'sh qobiqning maksimal ko'chish qiymati suyuqligi bo'lgan qobiqnikidan 2,4 marta katta; Qalinlikning oshishi amplitudaning pasayishiga va to'lqin tezligining oshishiga olib keladi. $h/\xi = 0,1$ da tebranishlar amplitudasi $h/\xi = 0,01$ ga nisbatan 4,4 marta katta;

- suyuqlik tezligining oshishi harakat amplitudasining ham oshishiga olib keladi. $v = 0,21$ da ko'chish amplitudasining keskin sakrashi kuzatiladi. Suyuqlik oqimi tezligining oshishi bilan qobiqning uchlariga yaqin kesimlarida σ_{zz} va σ_{rz} kuchlanishlarining ham keskin o'sishi kuzatiladi;

8. O'zgarimas tezlik bilan oqayotgan suyuqlik ta'siridagi silindrik qobiqning bo'ylama tebranishlari o'rganildi. O'rta qatlam qalinligi, materiallar va qatlamlar joylashishining uch qatlamli qobiq bo'ylama tebranishlarining doiraviy chastotasiga ta'siriga baho berilgan:

- qobiqda zichligi yuqoriroq bo'lgan suyuqlikning mavjudligi $k \geq 2$ qiymatlarda tebranish chastotasining pasayishiga, $k < 2$ bo'lganda esa tebranish chastotasining oshishiga olib keladi. Masalan, $k = 0,5$ bo'lganda tashqi qatlamlari alyuminiy va ichida kerosin bo'lgan qobiqning tebranish chastotasi tashqi qatlamlari alyuminiy va ichida geliy bo'lgan bo'lgan qobiqning tebranish chastotasidan 5 baravar yuqori bo'ladi;

- uch qatlamli qobiqlarni ishlab chiqarishda faqat tashqi qatlamlar uchun metallardan foydalanish mumkin, o'rta qatlam uchun esa zichligi va elastiklik moduli kichik bo'lgan materiallardan (masalan, polimer, tekstolit, shisha tolali va boshqalar) foydalangan ma'qulroq;

- qobiqning tashqi qatlamlari sifatida zichligi yuqori bo'lgan materiallardan (mis) foydalanish zichligi kichikroq materiallardan (alyuminiy) tayyorlangan tashqi qatlamlarga nisbatan chastotaning pasayishiga olib keladi.

9. Umuman olganda, dissertatsiya ishida olingan tadqiqot natijalari qatlamli qovushoqelastik silindrik va kesik konussimon qobiqlar tebranishlariga oid ba'zi masalalari uchun harorat, qatlam materiallarining anizotropiyasi, qalinligining o'zgaruvchanligi va boshqa fizik-mexanik omillarni hisobga olgan holda, uch qatlamli doiraviy silindrik qovushoqelastik qobiqning buralma va bo'ylama-radial nostatsionar tebranishlarining matematik nazariyalarini ishlab chiqish usulini keng yoyish uchun asos yaratadi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИМЕНИ ШАРАФА РАШИДОВА**

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ШАРАФА РАШИДОВА**

ЯЛГАСHEВ БУРХОН ФАЙЗУЛЛАЕВИЧ

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СЛОИСТОЙ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ ОБОЛОЧКИ,
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

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

Тема диссертации доктора наук (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № 31.12.2020/B2020.4.FM90.

Докторская диссертация выполнена в Самаркандском государственном архитектурно-строительном институте имени Мирза Улугбека.

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

Научный консультант: Худойназаров Хайрулла
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Мардонов Батиржан
доктор физико-математических наук, профессор
Пшеничных Сергей Геннадиевич
доктор физико-математических наук, профессор
Сафаров Исmoil Иброхимович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Национальный исследовательский университет
«Ташкентский институт инженеров ирригации и
механизации сельского хозяйства»

Защита диссертации состоится «02» февраля 2024 года в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 при Самаркандском государственном университете имени Шарафа Рашидова (Адрес: 140104, г.Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, факс: (+99866) 239-11-40, e-mail: devonxona@samdu.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета имени Шарафа Рашидова (Адрес: 140104, Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (+99866) 239-17-25) N: 121

Автореферат диссертации разослан «16» января 2024 года
(Реестр протокола рассылки № 1 от «16» января 2024 года)



Р.И.Халмурадов
Председатель научного совета
по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор

У.А.Пишинов
Ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней,
доктор философии по физико-математических наук

К.И.Исмаилов
Председатель научного семинара при
научном совете по присуждению ученых степеней,
доктор физико-математических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире на основе определения экономической эффективности слоистых композитных конструкций, являющихся основными несущими элементами различных инженерных объектов, большое значение придается проблемам снижения расхода материалов и их рационального использования. Необходимость подобных исследований в современной инженерной практике является одной из важнейших задач в области строительства и машиностроения, что в конечном итоге приводит к снижению веса, надежности и долговечности конструкций и машин, а также к сокращению материалов и затраты. Поэтому в технически развитых странах мира теоретические и экспериментальные исследования посвящены изучению поведения слоистых композиционных элементов под воздействием широкого спектра динамических нагрузок, которые необходимы для решения задач повышения прочности конструкций, инженерных сооружений, их эксплуатации в соответствии с современными экстремальными условиями.

В мире все больше находят практическое применение слоистые композитные материалы, в частности трубы, взаимодействующие с газожидкостными средами, и изделия машиностроения из них. В этом направлении ведутся интенсивные научные исследования по созданию новых, нетрадиционных материалов, направленных на поиск новых научно-технических решений вышеперечисленных проблем, а также создание и внедрение элементов летательных аппаратов, машин и конструкций. Исследования ученых направлены на создание новых композиционных материалов, обладающих особо высокой прочностью, и создание на их основе новых легких и прочных конструкций, заранее создавая их важные для практики свойства. Поэтому, созданию математических моделей различных колебательных процессов, более точное определение напряженно-деформированного состояния, а также численные исследования конструктивных элементов различных инженерных сооружений из композитов с учетом взаимодействия с другими средами уделяется особое внимание.

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. ... »³. При решении поставленных задач, в частности, для

³ Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № УП-4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

повышения несущей способности конструкций, в том числе с использованием нелинейно-упругих материалов, одной из важных проблем разработка усовершенствованных математических 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. Работа выполнена в рамках ПФИ-4 «Математика, механика и информатика» приоритетного направления развития науки и технологий республики Узбекистан.

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. Различные методы исследования задач динамики, и некоторые другие вопросы, связанные с взаимодействием деформируемых твердых тел со сплошной средой, а также фундаментальные теоретические и экспериментальные проблемы создания эффективных математических моделей изучены в работах, И.Г.Филиппова и В.Г.Чебана, I.Lottati, I.Elishakoff, H.Yajuan, W.Abassi, F.Pellicano, P.V. Gonsalves, A.S. Sayyad, Y.M. Ghugal, J.N. Reddy, С.Г.Пшеничнова, С.В.Иванова, Л.И. Могилевича, Б.А.Худаярова, В.М.Дубровина, Т.А. Бутиной, К.Султанова, М.Мирсаидова, Р.А.Абдикаримова, А.Б.Ахмедова и других.

Большой интерес представляют исследования по разработке уточненных теорий нестационарного колебания вырожденных систем. На основе точной трехмерной постановки задач линейной теории были разработаны уточненные теории продольного и поперечного колебаний упругих (Г.И.Петрашень) и вязкоупругих (И.Г.Филиппов) пластин и круглых стержней с учетом окружающей среды, многослойности и сил трения. Х.Худойназаровым разработан теория нестационарных колебаний вязкоупругой цилиндрической оболочки, и в отличие существующих теорий колебания, впервые была введена “промежуточная” поверхность, как основная поверхность, несущая информацию о колебании точек цилиндрической оболочки, радиус которой выражается через внутренний и внешний радиусы оболочки.

При этом полученные уравнения колебания, в отличие от классических и уточненных типа С.П.Тимошенко теорий, автоматически учитывают инерцию вращения и деформацию поперечного сдвига. Кроме того, отказ от традиционно принятого положения о том, что в качестве основной поверхности следует принять срединную поверхность цилиндрического слоя, позволил более точно, чем известные теории, сформулировать кинематические и динамические условия в задачах о динамическом взаимодействии круговых цилиндрических слоев, оболочек и стержней с деформируемой средой (Ж.Н. Абдираззаков, Д.Ш. Холиков). Еще одно преимущество этого метода заключается в том, что наряду с уравнениями колебания можно получить аналитические формулы для полей перемещений и напряжений, что нельзя, к сожалению, выполнить в случаях классического или уточненного типа С.П.Тимошенко теорий. Развитию предложенного им метода для цилиндрической вязкоупругой оболочки, взаимодействующей с вязкой сжимаемой жидкостью посвящены работы (А. Абдирашидов, Ф.А.Амиркулова, Ш.М.Буркутбоев).

Различные задачи динамического взаимодействия сплошной среды и конструкционных элементов таких как оболочки, пластины и стержни, применяемых в инженерной практике, в частности, с идеальной и вязкой жидкостями, исследованы в многочисленных статьях и обобщающих трудах многочисленных авторов (H.Yajuan, S.Yunhui, P.Panpan, Y.L. Zhang, J.M. Reese). Среди этих задач наиболее полно изучены вопросы взаимодействия различных жидкостей с твердыми структурами. Анализ исследований и обзор работ, посвященных этой проблеме, приведены в обзорных статьях и монографиях (K.J. Bathe, S. Lakovlev, H. Huang).

Для задач инженерной практики интересны задачи гидроупругости для тонких пластин и оболочек в случае вязкой жидкости, которые изучены еще недостаточно. Некоторые результаты для частных случаев нестационарного деформирования сферических и цилиндрических оболочек в вязкой жидкости представлены в работах K.N. Karagiozis, M.P. Paidoussis, M. Amabili, A.G.Shah, T.Mahmood, M.N. Naeem, S.H. Arshad, Кьи Твин. Вынужденные колебания цилиндрических оболочек, полностью заполненных жидкостью, а также колебания и динамическая устойчивость оболочек вращения, близких к цилиндрическим оболочкам, находящихся под действием нормального давления и меридиональных усилий рассмотрены в работах П.С. Ковальчука, Л.А.Крука и С.Н. Кукуджанова.

Фундаментальные результаты в этом направлении принадлежат R.P.Darmond, W.T.Ronleau и А.Н.Гузю. Эти работы имеют прямое отношение к вопросам, рассматриваемым в диссертационной работе. Отметим, что в настоящее время исследованы многочисленные вопросы аэрогидроупругости (для стационарных задач, для покоящихся и движущихся жидкостей и газов, в линейной и нелинейной постановках и т.д.). Результаты этих исследований нашли отражение в большом числе публикаций (F.Alijani, M.Amabili). При описании движения упругих тел в этих работах принимались двухмерные прикладные теории, построенные с привлечением гипотез Кирхгофа-Лява,

С.П.Тимошенко и т.д., а в отдельных случаях и с учетом начальных напряжений (В.Д. Кубенко, А.В.Нетребко, С.Г.Пшеничнов, А.Н.Гузь и др).

Подытожив исследования по изучению многочисленных публикаций, можно констатировать тот факт, что математическая теория колебания слоистых упругих и вязкоупругих цилиндрических оболочек, содержащих вязкую сжимаемую жидкость отсутствует. Поэтому, в этой области необходима разработка новых теорий и методов расчета. В настоящей диссертации некоторые, нерешенные из перечисленных проблем находят свои решения с развитием новых алгоритмов и методик расчета трехслойных цилиндрических слоев, оболочек и стержней с учетом влияния содержащейся в них вязкой сжимаемой жидкости.

Степень изученности проблемы. Многие зарубежные ученые внесли большой вклад в развитие теорий колебаний оболочек, используя различные гипотезы и упрощения. В их числе Х. Кирхгоф, А. Ляве, С. П. Тимошенко, В. В. Новожилов, Р. М. Финкельштейн, Х. М. Муштари, В. М. Даревский, Е. И. Григолюк, С. А. Амбарцумян, Ю. И. Юань, У. К. Нигуль, Г. Германн, И. Мирский, В. З. Власов, И. Г. Филиппов, Ю. Кудличка, J.O.Kim, H.Y.Chun, Xuebin Li⁴ и другие.

Многими узбекскими учеными проведены эффективные исследования по расчету динамики слоистых элементов конструкций, в том числе, слоистых и однородных оболочек и пластин, их разработке и совершенствованию. Среди них академики Т.Ширинкулов, Т.Рашидов, М.Мирсаидов, профессора К.Султанов, Х.Худойназаров, И.Сафаров, М.Усаров, А.Ахмедов, Б.Мардонов, Т.Мавлонов, Р.Абдукаримов, К. Исмаилова, Р.Абирова, И.Мирзаева и других. В результате научных исследований, проводимых этими учеными и их научными школами, достигаются значительные результаты в решении проблем повышения эффективности оболочечных конструкций и применения их в отраслях народного хозяйства.

При этом необходимо признать, что на круговые цилиндрические однородные, многослойные и композитные оболочки влияют внешние динамические нагрузки, вязкоупругость, пластичность, анизотропия и другие физико-механические свойства материала и влияющие среды, в частности недостаточно работы по хорошему изучению теорий вибрации, учитывающих влияние внешних неподвижных или текущих вязких жидкостей, по их разработке и уточнению, по созданию новых математических моделей.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование соответствует с планами научно-

⁴ Обзор международных научных исследований по теме диссертации проводился на основе следующих источников: *F.Pellicano* Vibrations of circular cylindrical shells: theory and ex-periments // *Journal of Sound and Vibration* – 2007. 303. *A.S. Sayyad, Y.M. Ghugal* On the free vibration analysis of laminated composite and sandwich plates: A review of recent literature with some numerical results // *Composite Structures* 2015 129. *F. Alijani, M. Amabili.* Non-linear vibrations of shells: A literature review from 2003 to 2013 // *International Journal of Non-Linear Me-chanics*, Elsevier, 2014, 26. *H.T. Banks, S. Hu, and Zackary R. Ken.* A Brief Review of Elastic-ity and Viscoelasticity for Solids // *Advances in Applied Mathematics and Mechanics* Vol. 3, No.1 ва бошқалар.

исследовательских работ Самаркандского государственного университета по теме «Исследование устойчивости и колебания дискретно-непрерывных систем, взаимодействующих с деформируемой средой» (2010-2025 гг.).

Целью исследования является разработка математических моделей динамического расчета нестационарных, осесимметричных колебаний трехслойных цилиндрических вязкоупругих оболочек, находящихся под действием динамических нагрузок; создание алгоритмов определения полей перемещений и напряжений в точках произвольного сечения трехслойных оболочек; применение разработанных моделей для решения прикладных задач колебания трехслойных композитных и однородных цилиндрических оболочек и стержней.

Задачи исследования:

создание новой математической модели осесимметричных колебаний круговой цилиндрической трехслойной вязкоупругой оболочки, взаимодействующей с вязкой сжимаемой жидкостью, и включающая в себя общие и уточненные уравнения колебания и постановку прикладных задач колебания оболочки;

разработка алгоритма, позволяющие по полю искомым функций однозначно определить напряженно-деформированное состояние в любой точке произвольного сечения круговой цилиндрической трехслойной вязкоупругой оболочки по результатам решения соответствующих задач об осесимметричных её колебаниях;

создание нового метода динамического расчета круговых цилиндрических трехслойных вязкоупругих оболочек, взаимодействующих с вязкой жидкостью на действие различных внешних динамических, в частности ударных и сейсмических, нагрузок;

на основе предложенной математической модели и метода расчета решение прикладных задач колебания трехслойных композитных и однородных цилиндрических оболочек, содержащих жидкость и ориентированных на решение актуальных проблем, связанных со строительством, техникой и другими областями.

Объектом исследования является трехслойная цилиндрическая вязкоупругая оболочка.

Предмет исследования – нестационарные крутильные и продольно-радиальные колебания и колебательные процессы в трехслойных цилиндрических вязкоупругих и упругих оболочках.

Методы исследования. В процессе проведения исследований использовались методы математического и численного моделирования, фундаментальные балансовые законы механики сплошной среды, феноменологические законы.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны новые математические модели крутильных и продольно-радиальных колебаний трехслойной круглой цилиндрической вязкоупругой

оболочки под действием внешних динамических нагрузок, в том числе классические модели и модели типа С.П. Тимошенко;

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

создан алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния в точках произвольных сечений слоев при нестационарных крутильных и продольно-радиальных колебаниях круглой цилиндрической трехслойной вязкоупругой оболочки;

сформулированы практические задачи нестационарных крутильных и продольно-радиальных колебаний круглой цилиндрической трехслойной вязкоупругой оболочки под действием динамических нагрузок и разработана соответствующая методика расчета;

исследованы продольные колебания круглой цилиндрической трехслойной оболочки, через которую с постоянной скоростью течет вязкая жидкость, и обоснован методика оценки влияния толщины среднего слоя, материала и расположения слоев на круговую частоту.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

новые математические модели динамического расчета крутильных и продольно-радиальных колебаний трехслойной круглой цилиндрической вязкоупругой оболочки под действием внешних динамических нагрузок;

полученные результаты по определению закономерностей перемещений и напряжений в зависимости от пространственных и временных координат в сечениях трехслойных цилиндрических вязкоупругих и упругих оболочек в процессах нестационарного кручения и продольно-радиальных колебаний;

закономерности изменения параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние произвольных точек слоев при нестационарных крутильных и продольно-радиальных колебаниях круглой цилиндрической трехслойной вязкоупругой оболочки под действием динамических нагрузок;

алгоритм расчета, позволяющий провести численный расчет задач гармонического крутильного и продольно-радиальных колебаний круговых цилиндрических трехслойных упругих и вязкоупругих оболочек с помощью практических математических пакетов методом распространения волн.

Достоверность результатов исследования подтверждаются использованием метода точных решений соответствующих задач теории вязкоупругости при выводе уравнений колебания, применением интегральных преобразований Фурье-Лапласа, методов разложения в степенные ряды, и других методов математической физики, а также систематической проверкой полученных результатов с результатами других авторов, в частности, для круговой цилиндрической однородной оболочки.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования объясняется созданием и развитием нового метода вывода уравнений нестационарных, крутильных и продольно-радиальных колебаний композитных трехслойных цилиндрических вязкоупругих оболочек, решения новых прикладных задач о колебаниях композитных слоистых оболочек, находящихся по воздействию внешних динамических, в частности импульсных и сейсмических, нагрузок и возможностью обобщения разработанных методов для конструктивных элементов других структур, в частности, для конических оболочек и стержней, для оболочечных структур эллиптического поперечного сечения, для пластин и другие.

Практическая значимость результатов исследований объясняется разработкой аналитико-численных алгоритмов решения прикладных задач определения параметров НДС при крутильных и продольно-радиальных колебаниях трехслойных композитных оболочек с учетом внешних динамических нагрузок; возможностями обобщения полученных результатов, носящих общий характер, на аналогичные задачи математической физики с учетом реологических, анизотропных и других свойств их материала.

Внедрение результатов исследования. На основе разработанных математических моделей, вычислительных методов и алгоритмов для численного анализа нестационарного колебания трехслойных композитных оболочек проведены:

Расчет критических значений нормального напряжения, вызванного внешней импульсной нагрузкой, в точках композитной трехслойной цилиндрической оболочки (трубопровода), содержащей вязкую сжимаемую жидкость внедрена в ООО “YANGIOBOD BUNYODKOR QURILISH” для определения предела прочности трубопровода в его сечениях по всей длине на основании которых осуществлено их проектирование. Полученные результаты позволяют (справка Министерства Строительства и жилищно-коммунального хозяйства Республики Узбекистан № 08-06/8138 от 18 августа, 2023 г.) уменьшить расходы на 7-8% по сравнению с нормой;

Способ определения наибольших радиальных напряжений в точках трехслойной цилиндрической оболочки, возникающих в результате воздействия движущихся кратковременных нагрузок, внедренный в ООО “QISHLOQQURILISHLOYINA” позволили установить, что в действительности допустимые нагрузки более низкие, чем расчетные нагрузки, определенные по расчету однослойных цилиндрических оболочек. Учет данного фактора (справка Министерства Строительства и жилищно-коммунального хозяйства Республики Узбекистан № 08-06/8138 от 18 августа, 2023 г.) при проектировании позволил предусмотреть экономию расходных материалов до 9%;

Уточненный расчет с учетом слоистой композитности материала оболочки применен в ООО “QISHLOQQURILISHLOYINA”, который позволил установить, что расчет усилий и перемещений по классической теории дает завышенные результаты. Учет данного факта позволяет сэкономить фактора (справка Министерства Строительства и жилищно-

коммунального хозяйства Республики Узбекистан № 08-06/8138 от 18 августа, 2023 г.) расходы на материалы и проведения работ до 7-9%;

Определение возможных точек и величин выпучивания путем нахождения наибольшего радиального перемещения точек произвольного сечения композитной трехслойной цилиндрической оболочки внедрено в ООО “YANGIOBOD BUNYODKOR QURILISH”. Подкрепление таких точек с помощью местных кольцевых поясов позволило повысить (справка Министерства Строительства и жилищно-коммунального хозяйства Республики Узбекистан № 08-06/8138 от 18 августа, 2023 г.) несущую способность оболочки до 7%;

Расчеты динамической деформации, в сечениях цилиндрической трехслойной оболочки, с учетом слоистости по поперечному сечению при действии на нее комбинированного воздействия статических и динамических нагрузок, внедренный в ООО “AZIZ PROEKT PLAN” показали, что полученные результаты в конечном итоге дают возможность применить более легкие и экономичные материалы (справка Министерства Строительства и жилищно-коммунального хозяйства Республики Узбекистан № 08-06/8138 от 18 августа, 2023 г.) и соответственно снизить вес конструкции до 8%.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 5 международных и 1 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 1 монография и 19 статей в научных журналах и материалах республиканской и международной конференций, входящих в перечень научных изданий, предложенных ВАК Республики Узбекистан для защиты докторских диссертаций (DSc), в том числе 8 в изданиях индексируемых в базе данных SCOPUS (из них 1 в базе данных WOS) и 9 в республиканских научных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 196 страниц.

ОСНОВНОЕ 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, которая называется *«Нестационарное взаимодействие цилиндрических слоев и оболочек со сплошной средой. Основные уравнения и их решения»* посвящена обзору литературных источников, посвященных изучению проблемы нестационарного взаимодействия упругих и вязкоупругих тел и конструктивных элементов типа цилиндрических слоев, оболочек и стержней с деформируемой средой, в частности, идеальными и вязкими жидкостями. Осуществлены также постановки нескольких классов задач о нестационарных колебаниях трехслойных цилиндрических вязкоупругих оболочки и стержня, а также об их нестационарных взаимодействиях с вязкой сжимаемой жидкостью. Сделан выбор методики исследований и выработана общая программа дальнейших исследований, подлежащих реализации в рамках диссертационной работы. Приведены основные уравнения и соотношения гидровязкоупругости, применительно к вязкоупругим трехслойным оболочкам и стержням, а также вязким сжимаемым жидкостям.

В первом параграфе главы приведен обзор научных исследований, посвященных нестационарному взаимодействию конструктивных элементов с деформируемой средой. Отмечено, что современное развитие естествознания, а также различных его областей, запросы инженерной практики, а также новые технологии и техника постоянно ставят перед исследователями новые теоретические и прикладные задачи механики контактного взаимодействия. К указанному классу задач принадлежат и задачи создания и совершенствования моделей, описывающих нестационарное поведение материалов и конструкций из них, с учетом различных физико-механических свойств материалов, влияния взаимодействующей сплошной среды. Кроме того, разработки методов исследования динамического деформирования и прочностных характеристик материалов в рамках созданных и усовершенствованных моделей, ориентированных для работы в условиях контактного взаимодействия с окружающей или содержащейся средой и действии динамических внешних нагрузок, также примыкают к этому классу задач.

Решению указанных проблем посвящено большое количество публикаций посвящено исследованию указанных классов проблем механики деформируемого твердого тела. Различные методы исследования задач динамики, и некоторые другие вопросы, связанные с взаимодействием деформируемых твердых тел со сплошной средой, а также фундаментальные теоретические и экспериментальные проблемы создания эффективных математических моделей приведены в работах, И.Г.Филиппова и В.Г.Чебана, I.Lottati, I.Elishakoff, H.Yajuan, W.Abassi и др., F.Pellicano, P.V. Gonsalves, A.S. Sayyad, Y.M. Ghugal, J.N. Reddy, С.В.Иванова, Л.И. Могилевича, Б.А.Худаярова, В.М.Дубровина, Т.А. Бутиной, Х.Худойназарова и его учеников, К.Султанова, М.Мирсаидова, Р.А.Абдикаримова, А.Б.Ахмедова и других.

Большой интерес представляют задачи гидроупругости для тонких пластин и оболочек в случае вязкой жидкости, которые изучены еще

недостаточно. Некоторые результаты для частных случаев нестационарного деформирования сферических и цилиндрических оболочек в вязкой жидкости представлены в работах K.N. Karagiozis, M.P. Paidoussis, M. Amabili, A.G.Shah, T.Mahmood, M.N. Naeem, S.H. Arshad, Кьи Твин. Вынужденные колебания цилиндрических оболочек, полностью заполненных жидкостью, а также колебания и динамическая устойчивость оболочек вращения, близких к цилиндрическим оболочкам, находящихся под действием нормального давления и меридиональных усилий рассмотрены в работах П.С. Ковальчука, Л.А.Крука и С.Н. Кукуджанова. Фундаментальные результаты в этом направлении принадлежат R.P.Darmond и W.T.Ronleau и А.Н.Гузю. Эти работы имеют прямое отношение к вопросам, рассматриваемым в диссертационной работе. Отмечено, что в настоящее время исследованы многочисленные вопросы аэрогидроупругости (для стационарных задач, для покоящихся и движущихся жидкостей и газов, в линейной и нелинейной постановках и т.д.). Результаты этих исследований нашли отражение в большом числе публикаций. При описании движения упругих тел в этих работах принимались двухмерные прикладные теории, построенные с привлечением гипотез Кирхгофа-Лява, С.П.Тимошенко и т.д., а в отдельных случаях и с учетом начальных напряжений.

Изучение многочисленных литературных источников позволяет сделать вывод о том, что теория колебания упругих круговых цилиндрических слоев и оболочек обоснованы не полностью. Кроме того, если оболочка или слой находится в состоянии нестационарного взаимодействия с вязкой как несжимаемой, так и сжимаемой жидкостью, то приближенных теорий колебания цилиндрических слоев и оболочек практически отсутствуют, хотя они имеют непосредственное значение для расчета подземных и подводных сооружений и коммуникаций.

Во втором параграфе приведены основные уравнения движения трехслойной цилиндрической оболочки и вязкой сжимаемой жидкости. В цилиндрической системе координат рассматривается неоднородная по толщине трехслойная круговая цилиндрическая оболочка из вязкоупругого материала. Считается, что рациональная конструкция оболочки с точки зрения

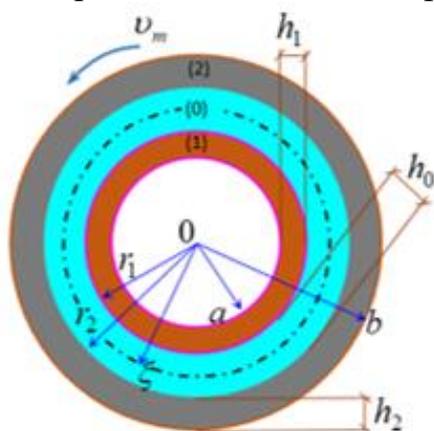


Рис.1 Поперечное сечение трехслойной цилиндрической оболочки

её работы на действие динамических нагрузок будет такой, когда основная масса жесткого материала в виде двух слоев, называемые в дальнейшем несущими слоями разнесена на некоторое расстояние с помощью тонкой стенки или третьего слоя. Третий слой называется в дальнейшем наполнителем. Заполнитель удерживает несущие слои на расстоянии, равном его толщине и осуществляет их совместную работу.

Ось Oz системы координат направлен по оси симметрии оболочки и слои пронумерованы так, как показана на рис.1а: а и b - внутренний и

внешний радиусы оболочки, а r_1 и r_2 - внутренний и внешний радиусы срединного слоя (заполнителя). При выводе уравнений колебания считается, что как цилиндрическая оболочка в целом, так и несущие слои и заполнитель, строго подчиняются математической теории вязкоупругости и в точной постановке описываются трехмерными её уравнениями в линейной постановке. Зависимости между компонентами напряжений и деформаций в точках слоев круговой цилиндрической трехслойной оболочки считаются заданными в виде

$$\begin{aligned}\sigma_{ii}^{(m)}(r, \theta, z, t) &= R_{\lambda m}(\varepsilon^{(m)}) + 2R_{\mu m}(\varepsilon_{ii}^{(m)}); \\ \tau_{ij}^{(m)}(r, \theta, z, t) &= 2R_{\mu m}(\gamma_{ij}^{(m)}); \quad (i \neq j); \quad (i, j = r, \theta, z),\end{aligned}\quad (1)$$

где $\sigma_{ii}^{(m)}$ - нормальные и $\tau_{ij}^{(m)}$ - касательные компоненты тензоров напряжений ($m = 0, 1, 2$); $\varepsilon_{ii}^{(m)}$ - нормальные и $\gamma_{ij}^{(m)}$ - угловые компоненты тензоров деформаций, $\varepsilon^{(m)}$ - объемные деформации; $R_{\lambda m}$, $R_{\mu m}$ - вязкоупругие операторы, равные

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

λ_m , μ_m - коэффициенты Ламе материалов слоев, $K_{\lambda m}(\tau)$ и $K_{\mu m}(\tau)$ - ядра интегральных операторов. При этом предполагается, что вязкоупругие операторы $R_{\lambda m}$ и $R_{\mu m}$ - обратимы, а их ядра $K_{\lambda m}(\tau)$ и $K_{\mu m}(\tau)$ - произвольные.

Уравнения движения точек слоев оболочки в цилиндрической системе координат (r, θ, z) , как цилиндрических трехмерных тел, при отсутствии объемных сил приведены к волновым уравнениям относительно потенциалов продольных - $\varphi^{(m)}$ и поперечных - $\vec{\phi}_m$ волн

$$R_m(\Delta \varphi^{(m)}) = \rho_m \ddot{\varphi}_m; \quad R_{\mu m}(\Delta \vec{\phi}_m) = \rho_m \ddot{\vec{\phi}}_m; \quad R_m = R_{\lambda m} + 2R_{\mu m}, \quad (3)$$

где ρ_m - плотности материалов слоев; Δ - трехмерный оператор Лапласа

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (4)$$

При этом все компоненты вектора перемещений и тензора напряжений в точках слоев выражены через потенциальные функции.

Аналогично, уравнения движения взаимодействующей вязкой жидкости приняты относительно потенциальных функций G и χ_1, χ_2

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(1 + \frac{4\nu'}{3a_0^2} \right) \Delta - \frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] G = 0, \quad \left(\frac{\partial}{\partial t} - \nu' \Delta \right) \zeta_1 = 0, \quad \left(\frac{\partial}{\partial t} - \nu' \Delta \right) \zeta_2 = 0, \quad (5)$$

где a_0 - скорость звука в покоящейся жидкости; ν' - кинематический коэффициент вязкости. Здесь также, через потенциальные функции G и ζ_1, ζ_2 выражены все компоненты тензора напряжений и вектора скоростей частиц жидкости.

В *третьем параграфе* поставлены задачи нестационарных колебаний цилиндрической трехслойной оболочки и взаимодействия ее с вязкой сжимаемой жидкостью. В зависимости от граничных условий здесь могут быть три типа задач о нестационарном колебании цилиндрического слоя,

содержащего жидкость. К ним относятся крутильные, продольно-радиальные и поперечные колебания слоя. Поэтому, в рамках настоящего параграфа осуществлены постановки задач о поперечных, продольно-радиальных и крутильных колебаниях гидроупругой системы «цилиндрический слой – жидкость».

Предполагается, что при $t < 0$ оболочка находится в покое, и в момент $t = 0$ к её граничным поверхностям прикладываются напряжения, вызывающие тот или иной вид её колебания. При крутильных колебаниях трехслойной оболочки граничные условия имеют вид

$$\begin{cases} \tau_{r\theta}^{(1)}(a, z, t) = F_{r\theta}^{(1)}(z, t), & \text{при } r = a, \\ \tau_{r\theta}^{(2)}(b, z, t) = F_{r\theta}^{(2)}(z, t), & \text{при } r = b. \end{cases} \quad (6)$$

где $F_{r\theta}^{(i)}(z, t)$, $(i = 1, 2)$ - функции внешних воздействий. Кроме того, по условиям жесткого контакта на граничных поверхностях между слоями должны выполняться условия равенства смещений и напряжений, т.е.

$$\begin{cases} v_0(r_1, z, t) = v_1(r_1, z, t), \quad \tau_{r\theta}^{(0)}(r_1, z, t) = \tau_{r\theta}^{(1)}(r_1, z, t), & \text{при } r = r_1, \\ v_0(r_2, z, t) = v_2(r_2, z, t), \quad \tau_{r\theta}^{(0)}(r_2, z, t) = \tau_{r\theta}^{(2)}(r_2, z, t), & \text{при } r = r_2. \end{cases} \quad (7)$$

Начальные условия задачи считаются нулевыми.

Крутильные колебания оболочки являются осесимметричной задачей. В этом случае уравнениями движения круговой цилиндрической вязкоупругой трехслойной оболочки будут

$$R_{\mu m}(\Delta_0 \psi_m) = p_m \frac{\partial^2 \psi_m}{\partial t^2}; \quad \Delta_0 = \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial r^2}, \quad m = \begin{cases} 1, & \text{если } a \leq r \leq r_1, \\ 0, & \text{если } r_1 \leq r \leq r_2, \\ 2, & \text{если } r_2 \leq r \leq b. \end{cases} \quad (8)$$

Таким образом задача о крутильных колебаниях трехслойной оболочки приводится к интегрированию уравнений (8) при граничных – (6), контактных – (7), а также нулевых при $t = 0$

$$\psi_m = \frac{\partial \psi_m}{\partial t} = 0, \quad (m = 0, 1, 2).$$

начальных условиях.

При продольно-радиальных колебаниях граничные условия имеют вид

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^{(1)}(a, z, t) = F_r^{(1)}(z, t), \quad \tau_{rz}^{(1)}(a, z, t) = F_{rz}^{(1)}(z, t), & \text{при } r = a, \\ \sigma_{rr}^{(2)}(b, z, t) = F_r^{(2)}(z, t), \quad \tau_{rz}^{(2)}(b, z, t) = F_{rz}^{(2)}(z, t), & \text{при } r = b. \end{cases} \quad (9)$$

и условия на поверхностях контакта

$$\begin{cases} w_0(r_1, z, t) = w_1(r_1, z, t), u_0(r_1, z, t) = u_1(r_1, z, t), \tau_{rz}^{(0)}(r_1, z, t) = \tau_{rz}^{(1)}(r_1, z, t), & r = r_1, \\ w_0(r_2, z, t) = w_2(r_2, z, t), u_0(r_2, z, t) = u_2(r_2, z, t), \tau_{rz}^{(0)}(r_2, z, t) = \tau_{rz}^{(2)}(r_2, z, t), & r = r_2. \end{cases} \quad (10)$$

Начальные условия задачи также, как и выше считаются нулевыми. В этом случае уравнениями движения будут

$$\begin{cases} R_m(\Delta_0 \varphi_m) = \rho_m \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial t^2}, R_{\mu m}(\Delta_0 \chi_m) = \rho_m \frac{\partial^2 \chi_m}{\partial t^2}, R_m = R_{\lambda m} + 2R_{\mu m}, (m = 0, 1, 2), & a \leq r \leq b. \end{cases} \quad (11)$$

Аналогично поставлены остальные краевые и контактные условия, для рассмотренных в диссертации задачах.

Четвертый параграф главы посвящен разработке общего метода решения задач о нестационарных колебаниях трехслойной цилиндрической оболочки из вязкоупругого материала. Данный метод подробно изложен в следующем разделе для случая крутильных колебаний трехслойной круговой цилиндрической вязкоупругой оболочки. Он основан на использовании общих точных решений в интегральных преобразованиях трехмерной задачи линейной теории вязкоупругости для приближенного удовлетворения граничных условий, заданных в напряжениях на внутренней и внешней поверхностях трехслойной оболочки. Через полученные общие решения выражены все компоненты вектора перемещений и тензора напряжений точек оболочки. В дальнейшем, в рамках данного раздела, для простоты выкладок рассмотрены осесимметричные колебания трехслойной оболочки. Данный метод, в упрощенном его варианте для разработки математической модели крутильных колебаний трехслойной цилиндрической вязкоупругой оболочки изложен ниже, в рамках *второй главы*, посвященной разработке теории крутильных колебаний круговой цилиндрической вязкоупругой трехслойной оболочки.

В *первом параграфе второй главы* выведены уравнения крутильных колебаний круговой цилиндрической вязкоупругой трехслойной оболочки. При выводе общих, а из них и приближенных уравнений нестационарных крутильных колебаний круговой цилиндрической вязкоупругой оболочки, необходимо решить сформулированной выше, начально-краевую задачу (6)-(8). Для этого функции внешних воздействий, в граничных условиях (6), рассматриваются в классе функций, представимых в виде

$$F_{r\theta}^{(i)}(z, t) = \int_0^\infty \left. \begin{matrix} \sin kz \\ -\cos kz \end{matrix} \right\} dk \int_{(l)} f_{r\theta}^{(i)}(k, p) e^{pt} dp, \quad (i = 1, 2). \quad (12)$$

Здесь (l) – разомкнутый контур, в плоскости p , примыкающий справа к участку $(-i\omega_0, i\omega_0)$ мнимой оси. Кроме того, функции $F_{r\theta}^{(i)}(z, t)$ предполагаются такими, что функции $f_{r\theta}^{(i)}(z, t)$, $(i = 1, 2)$ пренебрежимо малы вне области $\{0 < k < k_0, \text{Im}|p| < \omega_0\}$. Аналогично (12) потенциальные функции ψ_m также представим как

$$\psi_m = \int_0^\infty \left. \begin{matrix} \sin kz \\ -\cos kz \end{matrix} \right\} dk \int_{(l)} \tilde{\psi}_m e^{pt} dp, \quad (13)$$

при этом представления (13) позволяют, если выполнены приведенные выше условия относительно подынтегральных функций, дифференцировать функции ψ_m в нужный раз как по пространственной координате, так и по времени.

Далее, подставив преобразования (13) для потенциальных функций в волновые уравнения (8) будем иметь

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \beta_m^2 \right) \tilde{\psi}_m = 0, \quad (m = 0, 1, 2), \quad (14)$$

где

$$\beta_m^2 = k^2 + \rho_m p^2 \tilde{R}_{\mu m}^{-1}; \quad \tilde{R}_{\mu m} = \mu_m [1 - \tilde{K}_{\mu m}(p)].$$

Общие решения уравнений (14) имеют вид

$$\tilde{\psi}_m(r) = B_m^{(1)} I_0(\beta_m r) + B_m^{(2)} K_0(\beta_m r); \quad (m = 0, 1, 2), \quad (15)$$

где $I_0(r)$, $K_0(r)$ - модифицированные функции Бесселя; $B_m^{(1)}$, $B_m^{(2)}$ - подлежащие определению из граничных условий постоянные интегрирования; ρ_m - плотности материалов слоев; μ_m - коэффициенты Ламе.

Представив напряжения $\tau_{r\theta}$, также как (12) и подставив их вместе с (12) в граничные условия (6) с использованием представлений для потенциальных функций (13), будем иметь

$$\left. \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\tilde{\psi}_1}{dr} \right|_{r=a} = \tilde{R}_{\mu 1}^{-1} [f_{r\theta}^{(1)}]; \quad \left. \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\tilde{\psi}_2}{dr} \right|_{r=b} = \tilde{R}_{\mu 2}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}]. \quad (16)$$

Аналогично, преобразованные контактные условия (7), будут иметь следующие виды:

$$\begin{cases} \frac{d}{dr} \tilde{\psi}_1 = \frac{d}{dr} \tilde{\psi}_0, \quad \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\tilde{\psi}_0}{dr} = \tilde{R}_{\mu 0}^{-1} \tilde{R}_{\mu 1} \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\tilde{\psi}_1}{dr}, \quad \text{при } r = r_1, \\ \frac{d}{dr} \tilde{\psi}_0 = \frac{d}{dr} \tilde{\psi}_2, \quad \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\tilde{\psi}_0}{dr} = \tilde{R}_{\mu 0}^{-1} \tilde{R}_{\mu 2} \left(\frac{1}{r} - \frac{d}{dr} \right) \frac{d\tilde{\psi}_2}{dr}, \quad \text{при } r = r_2. \end{cases} \quad (17)$$

Общие решения (15) для всех трех слоев имеют одинаковую структуру, учитывающая ограниченность решений при $r \rightarrow 0$ и $r \rightarrow \infty$ одновременно. При этом границы первого слоя равны a и r_1 , т.е. $a \leq r \leq r_1$. Он ограничен снизу (изнутри) поверхностью $r = a$, который в пределе может стремиться к нулю, т.е. $a \rightarrow 0$, но никак не может превысить значения r_1 , т.е. не может стремиться к бесконечности. Поэтому, при написании общего решения потенциальной функции первого слоя- $\varphi_1(r)$ можно ограничиться учетом её ограниченности только при $r \rightarrow 0$. Исходя из этого, общее решение (15) для первого слоя примем в виде

$$\tilde{\psi}_1(r) = A I_0(\beta_1 r), \quad (a \leq r \leq r_1). \quad (18)$$

Рассуждая аналогично для второго, внешнего слоя установим, что общее решение (15) имеет вид

$$\tilde{\psi}_2(r) = C K_0(\beta_2 r), \quad (r_2 \leq r \leq b). \quad (19)$$

Для срединного слоя примем общее решение (15) учитывая то, что решение при отсутствии двух внешних слоев, должно переходит в известное решение для однородного цилиндрического слоя, ограниченное при $r \rightarrow 0$ и $r \rightarrow \infty$ т.е.

$$\tilde{\psi}_0(r) = B_1 I_0(\beta_0 r) + B_2 K_0(\beta_0 r), \quad r_1 \leq r \leq r_2. \quad (20)$$

Таким образом, число постоянных интегрирования, подлежащих определению из контактных условий, сокращается до двух A и C .

Определив постоянные A и C из контактных условий и подставив вместе с решением (19) в преобразованные граничные условия, получим

$$\begin{cases} -F_1(\beta_1, a, r_1) \beta_0^2 [I_2(\beta_0 r_1) B_1 + K_2(\beta_0 r_1) B_2] = \tilde{R}_{\mu 0}^{-1} [f_{r\theta}^{(1)}(k, p)], \\ -F_2(\beta_2, b, r_2) \beta_0^2 [I_2(\beta_0 r_2) B_1 + K_2(\beta_0 r_2) B_2] = \tilde{R}_{\mu 0}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}(k, p)]. \end{cases} \quad (21)$$

где
$$F_1(\beta_1, a, r_1) = \frac{I_0(\beta_1 a) - \frac{2}{\beta_1 a} I_1(\beta_1 a)}{I_2(\beta_1 r_1)}, \quad F_2(\beta_2, b, r_2) = \frac{K_0(\beta_2 b) + \frac{2}{\beta_1 b} K_1(\beta_2 b)}{K_2(\beta_2 r_2)}. \quad (22)$$

Выразив преобразованное по (13) крутильное перемещение $\tilde{v}_0(r, k, p)$ срединного слоя через общее решение (20), разложим присутствующих в его составе функции Бесселя $I_1(\beta_0 r)$ и $K_1(\beta_0 r)$ в степенные ряды по аргументу $(\beta_0 r)$. Получим

$$\tilde{v}_0(r, k, p) = \frac{1}{r} B_0^{(2)} + \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ -B_0^{(1)} + B_0^{(2)} \left[\ln \frac{\beta_0 r}{2} - \frac{1}{2} (\psi(n+1) + \psi(n+2)) \right] \right\} \beta_0^{2n+2} \frac{(r/2)^{2n+1}}{n!(n+1)!}. \quad (23)$$

Следуя проф. Х. Худойназарову примем за искомые величины перемещения и напряжений в точках некоторой промежуточной поверхности срединного слоя трехслойной оболочки, радиус ξ которой (Рис.1) определяется в промежутке $\xi \in [r_1, r_2]$ как $\xi = \frac{r_1}{2} \left(\chi - \frac{r_1}{r_2} \right)$. Заметим, что в зависимости от значений постоянного χ радиус ξ “промежуточной” поверхности может быть радиусом контактирующих поверхностей между слоями или срединной поверхности оболочки. Далее, для точек промежуточной поверхности введем следующие новые функции в преобразованиях

$$\tilde{v}_0^{(0)} = -\frac{1}{2} \beta_0^2 B_0, \quad \tilde{v}_0^{(1)} = \frac{1}{\xi} B_2, \quad \text{где } B_0 = B_1 - B_2 \left[\ln \frac{\beta_0 \xi}{2} - \psi(1) - \frac{1}{2} \right]. \quad (24)$$

Для комбинаций Бесселя функций –(22), ограничиваясь в их разложениях нулевым и первым приближениями, получим

$$\begin{aligned} F_1(\beta_1, a, r_1) &= \frac{a^2}{r_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - r_1^2}{12} \beta_1^2 + \frac{r_1^2 (a^2 - r_1^2)}{144} \beta_1^4 \right), \\ F_2(\beta_2, b, r_2) &= \frac{r_2^2}{b^2} \left[1 + \frac{r_2^2 - b^2}{4} \beta_2^2 + \frac{r_2^2 (r_2^2 - b^2)}{16} \beta_2^4 \right]. \end{aligned} \quad (25)$$

Выражения, заключенные в квадратные скобки в уравнениях (21) разложим в степенные ряды. Для этого используем стандартные разложения функций Бесселя, входящих в них. Далее в полученные уравнения подставим (24), которые с учетом (25) приводят к уравнениям

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{a^2}{r_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - r_1^2}{12} \beta_1^2 + \frac{r_1^2 (a^2 - r_1^2)}{144} \beta_1^4 \right) \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(r_1/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} \beta_0^{2n+2} \tilde{v}_0^{(0)} + \right. \\ & \left. + \xi \left[\frac{1}{2} \beta_0^2 - \frac{2}{r_1^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \eta_{2,n}(r_1) \frac{(r_1/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} \beta_0^{2n+4} \right] \tilde{v}_0^{(1)} \right\} = \tilde{R}_{\mu 1}^{-1} [f_{r\theta}^{(1)}(k, p)], \\ & \frac{r_2^2}{b^2} \left[1 + \frac{r_2^2 - b^2}{4} \beta_2^2 + \frac{r_2^2 (r_2^2 - b^2)}{16} \beta_2^4 \right] \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(r_2/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} \beta_0^{2n+2} \tilde{v}_0^{(0)} + \right. \\ & \left. + \xi \left[\frac{1}{2} \beta_0^2 - \frac{2}{r_2^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \eta_{2,n}(r_2) \frac{(r_2/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} \beta_0^{2n+4} \right] \tilde{v}_0^{(1)} \right\} = \tilde{R}_{\mu 2}^{-1} [f_{r\theta}^{(2)}(k, p)]. \end{aligned} \right. \quad (26)$$

Введем функции $v_0^{(0)}$, $v_0^{(1)}$ и операторы λ_m^n по формулам

$$[v_0^{(0)}, v_0^{(1)}] = \int_0^{\infty} \frac{\sin kz}{-\cos kz} \left. \right\} dk \int_{(\ell)} (\tilde{v}_0^0, \tilde{v}_0^{(1)}) e^{pt} dp, \quad \lambda_m^n(\xi) = \int_0^{\infty} \frac{\sin kz}{-\cos kz} \left. \right\} dk \int_{(\ell)} (\beta_m^{2n} \xi) e^{pt} dp. \quad (27)$$

Обратив по p и k условия (26), с учетом (27) получим

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{a^2}{r_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - r_1^2}{12} \lambda_1 + \frac{r_1^2 (a^2 - r_1^2)}{144} \lambda_1^2 \right) [C_{11}(r_1) v_0^{(0)} + \xi C_{21}(r_1) v_0^{(1)}] = R_{\mu 1}^{-1} [F_{r\theta}^{(1)}(z, t)], \\ & \frac{r_2^2}{b^2} \left[1 + \frac{r_2^2 - b^2}{4} \lambda_2 + \frac{r_2^2 (r_2^2 - b^2)}{16} \lambda_2^2 \right] [C_{12}(r_2) v_0^{(0)} + \xi C_{22}(r_2) v_0^{(1)}] = R_{\mu 2}^{-1} [F_{2\theta}^{(2)}(z, t)]. \end{aligned} \right. \quad (28)$$

где

$$C_{1i}(r_i) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_0^{n+1} \frac{(r_i/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!}; \quad C_{2i}(r_i) = \frac{1}{2} \lambda_0 - \frac{2}{r_i^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \eta_2(n, r_i) \lambda_0^{n+2} \frac{(r_i/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!}. \quad (29)$$

На основании выражений (14) для β_m ($m=0,1,2$) нетрудно получить, что введенные по формулам (27) операторы λ_m^n , при обратном переходе, в переменных z, t имеют следующие виды

$$\lambda_m^n(\xi) = \left[\rho_m R_{\mu m}^{-1} \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \right) - \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} \right]^n, \quad m=0,1,2; \quad n=1,2,3,\dots \quad (30)$$

где $R_{\mu m}$ - вязкоупругие операторы материалов слоев.

Уравнения (28) в соответствии с формулами (30) для операторов λ_m^n ($m=0,1,2; n=1,2,3,\dots$) являются интегро-дифференциальными уравнениями неограниченного порядка. Данные уравнения содержат в себе главные части $v_0^{(0)}$ и $v_0^{(1)}$ крутильного перемещения v_0 точек некоторой “промежуточной” поверхности срединного слоя трехслойной цилиндрической оболочки. Указанная “промежуточная” поверхность имеет радиус, значения которого заключена в интервале $r_1 \leq \xi \leq r_2$. В соответствии с числовым значением радиуса ξ данная “промежуточная” поверхность может перейти в срединную и контактные между слоями поверхности оболочки. Следовательно, уравнения (28) в зависимости от значений радиуса ξ , могут быть уравнениями колебания трехслойной цилиндрической вязкоупругой оболочки относительно главных

частей крутильного перемещения точек срединной или контактных поверхностей срединного слоя.

Во втором параграфе второй главы разработан алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния произвольной точки оболочки, который включает в себя определение перемещений v_m и напряжений $\tau_{r\theta}^{(m)}$ и $\tau_{z\theta}^{(m)}$ в точках всех трех слоев оболочки. Для этого потребуется выразить всех перемещений и напряжений через главные части $v_0^{(0)}$, $v_0^{(1)}$ крутильного перемещения v_0 , точек промежуточной поверхности срединного слоя оболочки. Сначала определено перемещение v_0 и напряжения $\tau_{r\theta}^{(0)}$ и $\tau_{z\theta}^{(0)}$ точек срединного слоя. Для нахождения v_0 необходимо подставить (24) в (23), затем обратить полученное выражение по (27) для \tilde{v}_0 по p и k . Выполнив данную процедуру получено

$$v_0(r, z, t) = C_1 v_0^{(0)} + \xi C_2 v_0^{(1)}, \quad (31)$$

где

$$C_1 = C_{1i}|_{r_i=r}, \quad C_2 = C_{2i}|_{r_i=r}.$$

По результатам решения системы уравнений (28) т.е. по найденным значениям $v_0^{(0)}$ и $v_0^{(1)}$ нетрудно вычислить перемещение $v_0(r, z, t)$ точек произвольного сечения срединного слоя для любого времени по формулам (31) с желаемой точностью по радиальной координате r . Аналогичные формулы выведены для всех напряжений и перемещений всех трех слоев. Например,

$$\tau_{r\theta}^{(2)} = \frac{r_2^2}{r^2} R_{\mu 0} \left\{ \left[1 + \frac{r_2^2 - r^2}{4} \lambda_2 \right] \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_0^{n+1} \left[2v_0^{(0)} + \xi \eta_{2,n}(r_2) \lambda_0 v_0^{(1)} \right] \frac{(r_2/2)^{2n+2}}{n!(n+2)!} + \xi \left(\frac{1}{2} \lambda_0 - \frac{2}{r_2^2} \right) v_0^{(1)} \right\} \right\}.$$

Таким образом, отличные от нуля при крутильных колебаниях, все компоненты векторов перемещений и тензоров напряжений слоев выражены через главные части $v_0^{(0)}$ и $v_0^{(1)}$ крутильного перемещения v_0 срединного слоя оболочки. Они позволяют определить напряженно-деформированное состояние произвольного сечения трехслойной оболочки по координатам r , z и по времени t с требуемой точностью.

В третьем параграфе второй главы выполнен анализ полученных, в первом и втором параграфах, результатов и предельных случаев уравнений крутильных колебаний трехслойной цилиндрической вязкоупругой оболочки. В частности, получены: уравнения крутильных колебаний двухслойной вязкоупругой оболочки; общие уравнения крутильных колебаний трехслойной цилиндрической оболочки с тонким заполнителем; уравнения крутильных колебаний трехслойной упругой оболочки; уравнения крутильных колебаний однородной вязкоупругой оболочки; уравнения крутильных колебаний вязкоупругого стержня и т.д.

В четвертом параграфе второй главы приведены некоторые приближенные уравнения крутильных колебаний круговой цилиндрической

вязкоупругой трехслойной оболочки. Уравнения (28) являются общими уравнениями крутильных колебаний круговой цилиндрической вязкоупругой трехслойной оболочки, относительно главных частей крутильного перемещения точек промежуточной поверхности срединного слоя. Эти уравнения содержат производные бесконечно высокого порядка по координате z и по времени t .

Кроме того, в своих правых частях правильно учитывают внешние усилия, приложенные к поверхностям оболочки. Если вязкоупругие операторы $R_{\mu 0}, R_{\mu 1}, R_{\mu 2}$ известны для соответствующих вязкоупругих сред, то уравнения (28) характеризуются правильным отражением зависимостей от них. Уравнения (28) из-за бесконечно высокого порядка по производным не пригодны для применения для решения прикладных задач динамики трехслойных оболочек. Применение их в инженерных расчетах также затруднено. Отсюда следует, что необходимо ограничить порядок уравнений в системе уравнений (28), т.е. в бесконечных суммах, входящих в их структуры, ограничиться нулевым ($n = 0$), первым ($n = 1$), вторым ($n = 2$) и т.д. приближениями. Так, ограничиваясь в уравнениях (2.1.48) нулевым приближением получена система уравнений

$$\begin{aligned} & \frac{a^2}{r_1^2} \left(1 + \frac{a^2 - r_1^2}{12} \lambda_1 + \frac{r_1^2 (a^2 - r_1^2)}{144} \lambda_1^2 \right) \times \\ & \times \left[\frac{r_1^2}{4} \lambda_0 v_0^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} (\lambda_0 - \frac{4}{r_1^2}) + \frac{r_1^2}{8} \left(\ln \frac{r_1}{\xi} - \frac{1}{4} \right) \lambda_0^2 \right) v_0^{(1)} \right] = R_{\mu 1}^{-1} [F_{r\theta}^{(1)}(z, t)], \\ & \frac{r_2^2}{b^2} \left[1 + \frac{r_2^2 - b^2}{4} \lambda_2 + \frac{r_2^2 (r_2^2 - b^2)}{16} \lambda_2^2 \right] \times \\ & \times \left[\frac{r_2^2}{4} \lambda_0 v_0^{(0)} + \xi \left(\frac{1}{2} (\lambda_0 - \frac{4}{r_2^2}) + \frac{r_2^2}{8} \left(\ln \frac{r_2}{\xi} - \frac{1}{4} \right) \lambda_0^2 \right) v_0^{(1)} \right] = R_{\mu 2}^{-1} [F_{r\theta}^{(2)}(z, t)]. \end{aligned}$$

Как видно из этих уравнений, интегро-дифференциальный оператор λ_0 имеет второй порядок по производным. Следовательно, в связи с линейностью оператора λ_0^2 , имеет в своем составе четвертые производные по координате, времени и смешанная производная четвертого порядка, т.е.

$$\lambda_0^2(\zeta) = \frac{1}{b_0^4} R_{\mu 0}^{-2} \left(\frac{\partial^4 \zeta}{\partial t^4} \right) - 2 \frac{1}{b_0^2} R_{\mu 0}^{-1} \left(\frac{\partial^4 \zeta}{\partial t^2 \partial z^2} \right) + \frac{\partial^4 \zeta}{\partial z^4}.$$

Аналогичные структуры имеют и операторы λ_1^2 и λ_2^2 .

Аналогично можно вывести и другие приближенные уравнения крутильных колебаний круговой цилиндрической вязкоупругой и упругой трехслойной оболочки, ограничиваясь другими приближениями. Заметим, что для правильной формулировки граничных условий при решении прикладных задач с привлечением того или иного приближения уравнений (28) следует также ограничиться тем же приближением в формулах для определения перемещений и ненулевых компонент напряжения всех слоев.

Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию гармонических крутильных колебаний и волн в цилиндрических трехслойных и однородных оболочках, взаимодействующих с вязкой жидкостью. В различных областях науки и техники, в частности, физики и механики, исследователи стараются свести анализ поведения волн в общем случае к анализу простейших гармонических волн. При этом обратный переход, т.е. переход от характеристик гармонического процесса к оценкам общего волнового движения в рассматриваемом теле с начальными условиями значительно затруднен. Несмотря на это, исследованию гармонических процессов в упругих и вязкоупругих телах уделяется большое внимание. Такое стремление исследователей связано с тем, что уже на промежуточном этапе решения задачи удается получить важные данные о таких характеристиках колебательных систем как фазовая и групповая скорости, собственные частоты и формы колебаний.

В рамках данной главы решены также задачи о собственных крутильных колебаниях однородной цилиндрической оболочки с учетом влияния внутренней вязкой жидкости. При решении указанных задач использованы уравнения колебания, выведенные в предыдущей главе с частичным использованием результатов более ранних работ автора.

В первом параграфе третьей главы решена задача о распространении гармонических крутильных волн в круговой цилиндрической упругой трехслойной оболочке. За основные уравнения колебания приняты выведенные во второй главе уравнения колебания (28) в нулевом приближении и в частном, упругом случае. В этом случае вязкоупругие операторы принимают вид

$$R_{\mu_m} = \mu_m, \quad (m=0,1,2),$$

где μ_m ($m=0,1,2$) -коэффициенты сдвига (коэффициенты Ламе) материалов слоев. Тогда операторы λ_m^n ($m=0,1,2; n=1,2,3,\dots$) принимают вид (2.1.52), т.е.

$$\lambda_m^n = \left[\frac{1}{b_m^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right]^n, \quad b_m^2 = \frac{\mu_m}{\rho_m}.$$

При этом $b_m = \left(\frac{\mu_m}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{2}}$, ($m=0,1,2$ -скорости распространения поперечных волн в материалах слоев. Переходя к безразмерным переменным в полученных уравнениях получено частотное уравнение

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 0,$$

здесь в состав A_{ij} входят частота ω и волновое число k до восьмой степени, а частотное уравнение в целом имеет 14-ю степень. Это уравнение решалось с помощью прикладной программы Maple 17. Результаты численных расчетов приведены в виде графиков круговой частоты колебаний в зависимости от волнового числа. На рис.2 приведены зависимости частоты ω от волнового

числа k при различных значениях толщины срединного слоя. Для расчетов в качестве материалов несущих слоев принята сталь, физико-механические

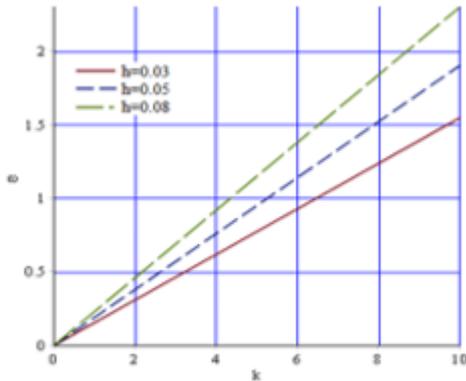


Рис.2 Зависимости частоты ω от волнового числа k при различных значениях толщины срединного слоя

параметры которой равны $\nu = 0.29$, $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ н/м}^2$. Срединный

слой оболочки считается полимерным со следующими упругими параметрами $\rho = 920 \text{ кг/м}^3$, $E = 2 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$, $\nu = 0.3$. Из

представленных графиков следует, что при фиксированных значениях волнового числа круговая частота колебаний трехслойной оболочки с более толстым срединным слоем выше по сравнению с круговой частотой оболочки с тонким срединным слоем. Например, при значении волнового

числа $k = 6$, частота колебаний оболочки со срединным слоем толщиной $h=0.08$ на 49.17% выше, чем частоты колебаний оболочки со срединным слоем толщиной $h=0.03$.

Во втором параграфе данной главы решена задача о гармонических крутильных колебаниях круговой цилиндрической трехслойной оболочки срединный слой, которой из вязкоупругого материала. В качестве ядра вязкоупругости примем регулярное ядро для среднего слоя в таком виде

$$K_0(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n}{\tau_n} e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n = 1,$$

при этом α_n - вязкоупругие параметры срединного слоя, τ_n - времена релаксации. Полученные результаты приведены в виде графиков частоты колебаний от волнового числа. На рис.3 приведены зависимости частоты колебаний

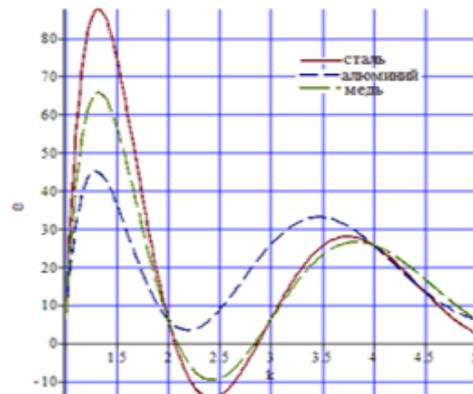


Рис.3 Зависимости частоты колебаний трехслойной оболочки от волнового числа при различных внешних слоях

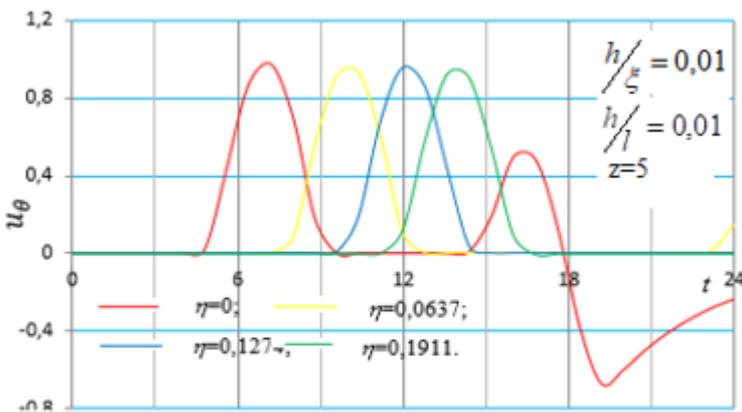


Рис.4 Зависимости перемещения u_θ от времени при различных η в сечении

трехслойной оболочки от волнового числа при различных материалах (Сталь, Алюминий, Медь) внешних слоев. При этом срединный слой вязкоупругий полимерный материал EDM-6. Приведенные графики зависимостей частоты от волнового числа показывают, что при одних и тех же

значениях волнового числа частота колебаний оболочки с внешним слоем из материала с большим значением модуля упругости больше, чем из материала с меньшим значением модуля упругости. Независимо от типа материала внешних слоев частота колебаний трехслойной оболочки имеет наибольшие значения в интервале значений волнового числа $0 \leq \kappa \leq 2$. Закон изменения частоты во всех трех случаях, близок к синусоидальному и характеризуется затуханием с возрастанием числа κ .

В третьем параграфе третьей главы решена задача о распространении крутильных волн в цилиндрической оболочке, взаимодействующей с внутренними и внешними потоками вязких жидкостей. Для численных расчетов материал оболочки примем стальным, физико-механические параметры которого следующие: $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,25$, $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ н/м}^2$. Безразмерная длина оболочки равна $l = 10$. Обозначено через $\eta = \rho_1 / \rho$ - отношение плотности возмущенной жидкости к плотности оболочки, и при расчетах варьируем только плотность жидкости. Полученные результаты приведены в виде графиков перемещения и напряжений. На рис.4 представлены графики изменения крутильного перемещения от времени при различных значениях плотности жидкости.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке математической теории нестационарных продольно-радиальных колебаний круговой цилиндрической трехслойной вязко-упругой оболочки, разработанная без применения гипотез и предпосылок, принимаемых в классической теории оболочек или в уточненных теориях типа Тимошенко, а также других упрощающих предположений математического или физического характера. При этом ядра вязкоупругих операторов, описывающих вязкие поведения материалов каждого из слоев оболочки, считаются произвольными. Внешние усилия, возбуждающие колебательный процесс в оболочке, считаются произвольными.

В первом параграфе четвертой главы исходя из точных решений трехмерной задачи линейной теории вязкоупругости, сформулированных для каждого слоя оболочки, выводятся общие уравнения нестационарных продольно-радиальных колебаний круговой цилиндрической трехслойной вязкоупругой оболочки, содержащие главные части продольного и радиального перемещений точек некоторой промежуточной поверхности срединного слоя, которая в предельных случаях может перейти во внутреннюю, внешнюю или в срединную поверхности срединного слоя оболочки. Выводятся формулы для всех ненулевых компонент тензора напряжений и вектора перемещений, позволяющие определить напряженно-деформированное состояние произвольного сечения оболочки с тем, что могут быть аналитически определены некоторые прочностные характеристики материалов слоев и оболочки в целом. Приводятся некоторые приближенные и уточненные уравнения поперечных колебаний оболочки и круглого цилиндрического стержня. Анализируются предельные и частные случаи.

Во втором параграфе разработан алгоритм определения напряженно-деформированного состояния вязкоупругой цилиндрической трехслойной оболочки, который включает в себя вывод аналитических формул определения перемещений u_m , w_m ($m = 0, 1, 2$) и напряжений $\sigma_{rr}^{(m)}$, $\sigma_{zz}^{(m)}$, $\sigma_{\theta\theta}^{(m)}$, $\tau_{zr}^{(m)}$ в заданных точках всех трех слоев через главные части $u_{0,0}$ и $u_{0,1}$ - продольного и $w_{0,0}$, $w_{0,1}$ - радиального перемещений точек промежуточной поверхности срединного слоя оболочки. Полученная формула, например, для перемещения точек срединного слоя имеет вид

$$u_0(r, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \delta_0^n \cdot u_{0,0} + q_1^{(0)} \cdot Q_n^{(0)} \left(\frac{\partial \tilde{w}_{0,0}}{\partial z} - \delta_0 u_{0,0} \right) \right\} \frac{(r/2)^{2n}}{(n!)^2} - \\ - \xi \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \delta_0^n \cdot u_{0,1} + \lambda_0 q_2^{(0)} Q_n^{(0)} \left(\frac{\partial \tilde{w}_{0,1}}{\partial z} - u_{0,1} \right) \right\} \eta_{3,n}(r) \frac{(r/2)^{2n}}{(n!)^2},$$

Аналогично, получена формула для определения радиального нормального напряжения второго несущего слоя

$$\left(\delta_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \sigma_{rr}^{(2)} = R_{\mu_2} \left\{ - \left[\left(\lambda_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + \delta_2 \left(2 + \frac{r^2}{r_2^2} \right) + \delta_2 \left(3\lambda_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \frac{r^2 - r_2^2}{8} \right] \frac{\partial u_0(r_2, z, t)}{\partial z} + \right. \\ \left. + \left[\lambda_2 \left(\lambda_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\lambda_2 + \delta_2) \frac{r^2 - r_2^2}{8} + \left(\lambda_2 - 3 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + \frac{r^2}{2r_2^2} \left(\delta_2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \right] \frac{2}{r_2} w_0(r_2) \right\}.$$

где операторы $\lambda_m^n(\zeta)$ имеют вид (30), а операторы $\delta_m^n(\zeta)$ - вид

$$\delta_m^n(\zeta) = \left[\rho_m R_m^{-1} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \right) - \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \right]^n, \quad m = 0, 1, 2; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Полученные формулы позволяют определить напряженно-деформированное состояние произвольного сечения трехслойной оболочки по пространственным координатам и времени с требуемой точностью.

В третьем параграфе четвертой главы рассмотрены некоторые предельные случаи и частные виды уравнений продольно-радиальных колебаний круговой цилиндрической вязкоупругой трехслойной оболочки, полученные в первом параграфе данной главы. Получены: 1) уравнения продольно-радиальных колебаний двухслойной вязкоупругой оболочки; 2) уравнения продольно-радиальных колебаний однородной вязкоупругой оболочки; 3) общие уравнения продольно-радиальных колебаний трехслойной цилиндрической оболочки с тонким наполнителем; 4) уравнения продольно-радиальных колебаний вязкоупругого стержня.

В четвертом параграфе приведены несколько вариантов приближенных уравнений продольно-радиальных колебаний вязкоупругой цилиндрической трехслойной оболочки. Как отмечается, полученные уравнения продольно-радиальных колебаний трехслойной оболочки, из-за бесконечно высокого порядка по производным, не пригодны для применения при решении прикладных задач динамики трехслойных оболочек. Применение их в инженерных расчетах также сильно затруднено. Отсюда

следует, что необходимо ограничить порядок уравнений в полученной системе уравнений, т.е. в бесконечных суммах, входящих в их структуры, ограничиться нулевым ($n=0$), первым ($n=1$), вторым ($n=2$) и т.д. приближениями. Предположив, что выполнены условия относительно области применимости «усеченных» таким образом уравнений, сформулированных проф. Х.Худойназаровым проанализированы различные приближения уравнений продольно-радиальных колебаний трехслойной оболочки.

Пятая глава диссертационной работы посвящена исследованию стационарных (гармонических) и нестационарных продольно-радиальных колебаний однородных цилиндрических слоев и оболочек с учетом влияния вязкой жидкости. Поэтому, сначала выведены уравнения колебания однородной упругой оболочки, как частный случай уравнений колебаний трехслойной упругой оболочки, полученных в четвертой главе. Затем, в полученные уравнения колебаний однородной упругой оболочки введены члены, учитывающие реакцию вязкой жидкости. Полученные таким образом уравнения колебания однородной оболочки с учетом влияния содержащейся в её полостях вязкой жидкости, применены для решения прикладных задач о гармонических и нестационарных продольно-радиальных колебаниях такой гидроупругой системы.

В первом параграфе пятой главы рассмотрена задача о продольно-радиальных колебаниях круговой цилиндрической упругой оболочки, содержащей покоящуюся вязкую сжимаемую жидкость. Получены уравнения колебания однородной упругой оболочки с учетом влияния содержащейся в её полостях вязкой жидкости. Приведен алгоритм, позволяющий по полю искомым функций однозначно определить напряженно-деформированное состояние точек произвольного сечения рассматриваемой гидроупругой системы по значениям искомым функций. Полученные уравнения колебания упругой оболочки, как частный случай уравнений колебания трехслойной вязкоупругой оболочки, совпадают с ранее известными собственными результатами.

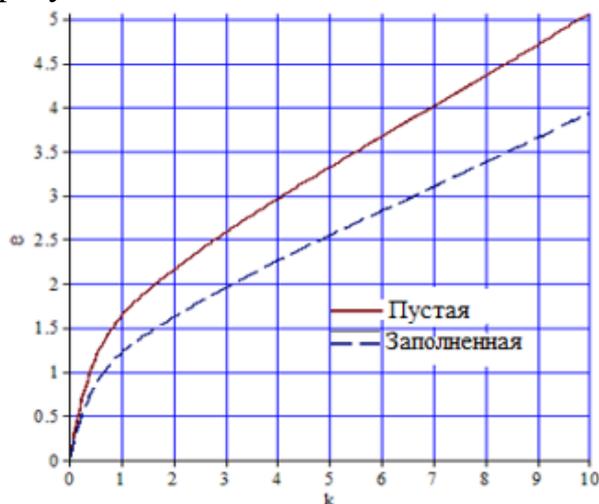


Рис.5. Зависимости ω от k для пустой и заполненной стальных оболочек ($h=0,01$)

для заполненного и незаполненного

жидкостью случаев. При $k=8$ разница
 Во втором параграфе на основе полученных уравнений колебания, исследуется распространение продольно-радиальных гармонических волн в упругом цилиндрическом слое, содержащей вязкую сжимаемую жидкость. Для описания поведения цилиндрического слоя с вязкой жидкостью применяются приближенные уравнения колебания, полученные в первом разделе. На рис.5 приведена зависимость частоты колебаний ω от волнового числа k для стального слоя толщиной $h=0,1$

между частотами заполненного и незаполненного жидкостью слоями составляет 27,1% против 71,4% для оболочки. Отсюда следует, что влияние жидкости на частоту колебаний оболочки в 1,9 раза больше, чем на частоту колебаний слоя. В случае заполнения она равна 28,6%. Отсюда следует, что влияние вязкой жидкости на частоты колебаний стальной оболочки больше чем на частоты колебаний медной оболочки. Другими словами, это означает, что влияние вязкой жидкости на частоты колебаний оболочки из твердого материала в несколько раз больше ($\approx 70\%$), чем из более мягкого материала ($\approx 26\%$).

В третьем параграфе решена задача о гармонических продольных колебаниях круговой цилиндрической упругой оболочки, когда в нем протекает вязкая жидкость с постоянной скоростью. С этой целью в цилиндрической системе координат (r, θ, z) рассмотрим круговую цилиндрическую трехслойную оболочку с срединным слоем с внутренним r_1 и внешним r_2 , радиусами $r_1 < r_2$, а также с протекающей с постоянной скоростью v вязкой жидкостью. Толщина оболочки постоянна и равна $h = r_2 - r_1$. В качестве разрешающих уравнений примем общие уравнения продольно-радиальных колебаний круговой цилиндрической упругой оболочки и выражения для интегро-дифференциальных операторов $\lambda^n, \delta^n, n = 0, 1, 2, \dots$, выведенных в разделе 4.3. При этом учтено, что при чисто продольных колебаниях трехслойной вязкоупругой оболочки следует положить равными нулю радиальные нормальные напряжения. Кроме того, в этом случае следует положить равным нулю радиальное перемещение. Для этого предположим, что радиальная составляющая перемещения произвольной точки срединного слоя оболочки отсутствует, т.е. $w_0 = 0$.

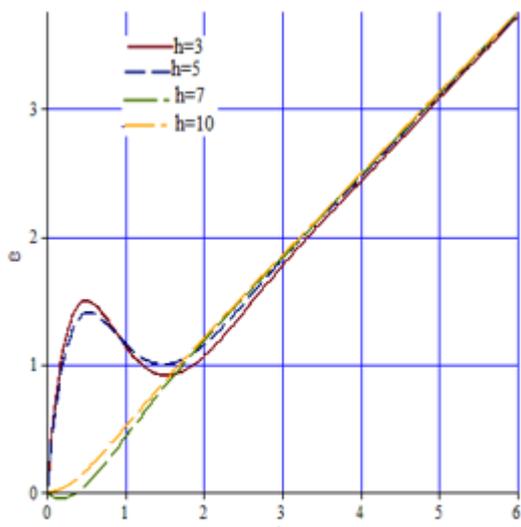


Рис.6 Зависимости круговой частоты от волнового числа трехслойной оболочки при различных толщинах с полимерным срединным и алюминиевыми внешними слоями

Полученные числовые результаты приведены на 14 рисунках, на основе которых установлены некоторые закономерности влияния содержащейся в полости трехслойной оболочки на частоту собственных ее колебаний. Так, на рис.6 приведены зависимости круговой частоты от волнового числа трехслойной оболочки при различных толщинах полимерного срединного слоя и алюминиевыми внешними слоями. Видно, что с увеличением толщины срединного слоя трехслойной оболочки и при малых значениях волнового числа $k \leq 2$, зависимости круговой частоты от волнового числа носит прямо пропорциональный характер. При более

тонких срединных слоях $h \leq 5$ при $k \leq 2$ появляются искривления графиков, которые означают то, что трехслойные оболочки с полимерными срединными

слоями с безразмерными толщинами $h \leq 5$, при достаточно длинноволновых процессах ведут себя по-иному (рис.6, рис.7). В таких случаях частота колебаний сначала резко возрастает, затем убывает при значениях волнового числа близких к $k \approx 1,5$ уравниваются и переходят в режим прямой пропорциональности между частотой и волновым числом. При $h \leq 7$ частота колебаний трехслойной оболочки с алюминиевыми внешними слоями несколько выше, чем частота колебаний трехслойной оболочки с медными внешними слоями. Например, для оболочки с толщиной $h=7$ это соотношение составляет 60%.

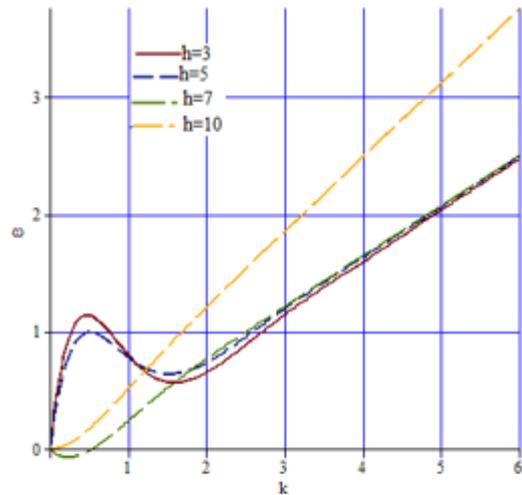


Рис.7 Зависимости круговой частоты от волнового числа трехслойной оболочки при различных толщинах с полимерным средним и медными внешними слоями

Следовательно, применение в качестве внешних слоев оболочки более плотных материалов (медь) приводит к уменьшению частоты по сравнению с внешними слоями из менее плотных (алюминий) материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Затрагиваемые в диссертационной работе проблемы исследования колебательных процессов в трехслойных круговых цилиндрических оболочках с учетом вязкоупругих свойств материала и взаимодействующей вязкой жидкости решены на основе точной трехмерной постановки и решения задач линейной теории вязкоупругости в преобразованиях. На этой основе:

1. Создан новый метод динамического расчета круговых цилиндрических трехслойных вязкоупругих оболочек, взаимодействующих с вязкой жидкостью на действие различных внешних динамических, в частности ударных и сейсмических, нагрузок;

2. Созданы новые математические теории крутильных и продольно-радиальных колебаний круговой цилиндрической трехслойной вязкоупругой оболочки, взаимодействующей с вязкой сжимаемой жидкостью, которая включает в себя общие и уточненные уравнения колебания трехслойных оболочек и постановку прикладных задач колебания оболочки;

3. Разработан алгоритм, позволяющий по полю искомых функций однозначно определить напряженно-деформированное состояние в произвольной точке любого сечения круговой цилиндрической трехслойной вязкоупругой оболочки по результатам решения соответствующих задач о крутильных и продольно-радиальных её колебаниях;

4. На основе предложенной математической модели и метода расчета решены прикладные задачи колебания трехслойных композитных и однородных цилиндрических оболочек, содержащих жидкость;

5. Решение задачи о гармонических крутильных колебаниях круговой цилиндрической вязкоупругой трехслойной оболочки показало, что предложенная теория и уравнения колебания трехслойной цилиндрической вязкоупругой оболочки позволяет однозначно определить зависимости между частотой колебаний и волновым числом;

6. Решена задача о распространении крутильных волн в круговой цилиндрической оболочке, взаимодействующей с внутренним и внешним потоками вязких жидкостей на основе метода конечных разностей. Полученные результаты решения позволили сделать выводы:

- по мере увеличения скорости жидкости амплитуда крутильного перемещения уменьшается без изменения скорости распространения волны. При этом наблюдается резкое изменение колебаний, когда скорость достигает некоторого “критического” значения. Напряжения также уменьшаются с увеличением скорости жидкости, но при достижении скорости жидкости “критического” значения в сечениях, близких к торцу оболочки, напряжение резко возрастает;

7. Изучены продольные колебания цилиндрической оболочки с протекающей с постоянной скоростью жидкостью:

- наличие покоящейся жидкости приводит к снижению амплитуды перемещений и запаздыванию волны. Максимальное значение перемещения пустой оболочки 2,4 раза больше, чем оболочки с жидкостью; увеличение толщины приводит к снижению амплитуды и к увеличению скорости волны. При $h/\xi = 0,1$ амплитуда колебаний 4,4 раза больше, чем при $h/\xi = 0,01$;

-увеличение скорости жидкости приводит к увеличению амплитуды перемещения. При $v = 0,21$ наблюдается резкий скачок амплитуды перемещения. С увеличением скорости потока жидкости наблюдаются также резкие увеличения напряжений σ_{zz} и σ_{rz} в сечениях оболочки, близких к торцам;

8. Изучено продольные колебания цилиндрической оболочки с протекающей с постоянной скоростью жидкостью. Даны оценки влияния толщины срединного слоя, материалов и расположений слоев на круговую частоту продольных колебаний трехслойной оболочки:

- наличие в полости оболочки более плотной жидкости при значениях $k \geq 2$ приводит к понижению частоты колебаний, а при $k < 2$, к повышению частоты колебаний. Например, при $k = 0,5$ частота колебаний оболочки с алюминиевыми внешними слоями, содержащая керосин в 5 раз больше частоты колебаний оболочки с алюминиевыми внешними слоями, содержащая гелий;

-для изготовления трехслойной оболочки металл использовать только для внешних слоев, а для срединного слоя лучше использовать материалы с более меньшими значениями плотности и модуля упругости (например, полимерные, текстолит, стеклопластик и другие);

- применение в качестве внешних слоев оболочки более плотных материалов (медь) приводит к уменьшению частоты по сравнению с внешними слоями из менее плотных (алюминий) материалов.

9. В целом, результаты исследований, полученные в диссертационной работе, создают основу для широкого распространения метода разработки математических теорий крутильных и продольно-радиальных нестационарных колебаний трехслойной круговой цилиндрической вязкоупругой оболочки на некоторые задачи о колебаниях слоистых вязкоупругих цилиндрических и усеченных конических оболочек с учетом температуры, анизотропии материалов слоев, переменности толщины и других физико-механических факторов.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 UNDER SAMARKAND STATE
UNIVERSITY NAMED AFTER SHARAF RASHIDOV**

**SAMARKAND STATE UNIVERSITY NAMED AFTER SHARAF
RASHIDOV**

YALGASHEV BURKHON FAYZULLAEVICH

**UNSTEADY VIBRATIONS OF A LAYERED CYLINDRICAL
VISCOELASTIC SHELL INTERACTING WITH A VISCOUS FLUID**

01.02.04 – Mechanics of deformable solids

**DISSERTATION ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Samarkand – 2024

The subject of doctor of sciences (DSc) dissertation is registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan, number. №31.12.2020/B2020.4.FM90

The dissertation has been prepared the Samarkand State University named after Sharaf Rashidov
The abstract of the dissertation is three languages (uzbek, russian, english (resume)) is posted on the website Scientific Council (www.samdu.uz) and the "Ziyonet" Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant: **Khudoynazarov Khayrulla**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Official opponents: **Mardonov Batirjan**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Pshenichnov Sergey Gennadievich
Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor

Safarov Ismoil Ibroximovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Leading organization: **"Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" National Research University**

Defense will take place 02 February 2024 at 14⁰⁰ at the meeting of Scientific Council number DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 Samarkand State University named after Sharaf Rashidov. (Address: University str. 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, tel: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, fax: (+99866) 239-11-40, e-mail: devonxona@samdu.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Samarkand State University named after Sharaf Rashidov (is registered №121) (Address: University str. 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, tel: (+99866) 239-17-25).

Abstract of dissertation sent out on «16» January 2024 year
(Mailing report № 1 on «16» January 2024 year)



R.I.Khalmuradov
Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
Doctor of technical sciences, Professor

U.A.Nishonov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degrees,
Doctor of philosophy (PhD) in
physical and mathematical sciences

K.Ismayilov
Vice-Chairman of scientific seminar under scientific
council on award of scientific degrees,
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the DSc dissertation)

The aim of the study is to develop mathematical models for the dynamic calculation of non-stationary, axisymmetric vibrations of three-layer cylindrical viscoelastic shells under the influence of dynamic loads; the creation of algorithms for determining displacement and stress fields at points of arbitrary cross-section of three-layer shells; and the application of the developed models to solve applied problems of vibration of three-layer composite and homogeneous cylindrical shells and.

The object of research work is a three-layer cylindrical viscoelastic shell.

The subject of the study is oscillatory processes and the propagation of non-stationary waves in three-layer cylindrical viscoelastic and elastic shells.

Research methods. In the process of conducting research, methods of mathematical and numerical modeling, fundamental balance laws of continuum mechanics, and phenomenological laws were used.

The scientific novelty of the study lies in the fact that the problems raised in it relate to the study of oscillatory processes in three-layer circular cylindrical shells. They were solved on the basis of an accurate three-dimensional formulation and solution to the three-dimensional problem of the theory of viscoelasticity in transformations.

On this basis:

new mathematical models of torsional and longitudinal-radial vibrations of a circular cylindrical three-layer viscoelastic shell interacting with a viscous compressible fluid have been created. This includes general and refined equations of vibration of three-layer shells and the formulation of applied problems of shell vibration;

an algorithm has been developed that makes it possible to unambiguously determine the stress-strain state at an arbitrary point of any section of a circular cylindrical three-layer viscoelastic shell based on the results of solving the corresponding problems about its torsional and longitudinal-radial vibrations from the field of the sought functions;

a new method has been created for the dynamic calculation of circular cylindrical three-layer viscoelastic shells interacting with a viscous fluid under the action of various external dynamic, in particular shock and seismic, loads;

based on the proposed mathematical model and calculation method, applied problems of vibration of three-layer composite and homogeneous cylindrical shells containing liquid were solved.

Implementation of research results. Based on the developed mathematical models, computational methods and algorithms for the numerical analysis of non-stationary vibrations of three-layer composite shells, the following was carried out:

Publication of research results. On the topic of the dissertation, 1 monograph and 19 articles were published in scientific journals included in the list of scientific publications proposed by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the defense of doctoral dissertations (DSc), including 8 in

publications indexed in the SCOPUS database (from there is 1 of them in the WOS database) and 9 in republican scientific publications.

Structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 196 pages.

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

I bo'lim (I часть; I part)

1. Худойназаров Х.Х., Ялгашев Б.Ф. Взаимодействие цилиндрических слоев и оболочек с вязкой жидкостью. Монография. // LAMBERT academic publishing. 2017 г.138 с.

2. Худойназаров Х., Ялгашев Б.Ф., Исмоилов Э. Собственные частоты крутильных колебаний свободно опертого по торцам цилиндрического слоя, заполненного вязкой сжимаемой жидкостью // Проблемы архитектуры и строительства (научно-технический журнал) – Самарканд, 2013. – № 1 – С. 67-70. (05.00.00.№14).

3. Худойназаров Х.Х., Ялгашев Б.Ф., Амиркулова Ш.Ж. Продольные колебания цилиндрической упругой оболочки, заполненной вязкой жидкостью // Узбекский журнал «Проблемы механики». – 2013. № 2. – С. 12–15. (01.00.00. №4).

4. Худойназаров Х.Х., Ялгашев Б.Ф., Амиркулова Ш.Ж. Собственные продольно-радиальные колебания свободно опертой по торцам цилиндрической оболочки // Узбекский журнал «Проблемы механики». – 2013. № 2. – С. 85–89. (01.00.00. №4).

5. Худойназаров Х., Ялгашев Б. Осесимметричные колебания вязкоупругого цилиндрического слоя, заполненного вязкой сжимаемой жидкостью // Научно-технический журнал «Проблемы архитектуры и строительства» 2016. №4. С.119-125. (05.00.00. №14).

6. Yalgashev B.F. Uch qatlamli kompozit silindrik qobiq buralma tebranishlarining matematik modeli // SamDU Ilmiy axborotnomasi, 2017, 3, B110-114. (01.00.00. №2).

7. Худойназаров Х., Ялгашев Б. Нестационарные колебания круговых цилиндрических трёхслойных оболочек // Научно-технический журнал «Проблемы архитектуры и строительства», №1, 2020. – С.118-122. (05.00.00. №14).

8. Ялгашев Б.Ф., Бердиев Ш.Д. Уравнения крутильных колебаний трехслойной круговой цилиндрической упругой оболочки // Научно-технический журнал «Проблемы архитектуры и строительства», №2, 2020. – С.138-143. (05.00.00. №14).

9. Khalmuradov R.I., Yalgashev B.F. Frequency analysis of longitudinal-radial vibrations of a cylindrical shell // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science -2020. 614 012087 [https://doi: 10.1088/1755-1315/614/1/012087](https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012087). (№ 3 Scopus).

10. Ялгашев Б.Ф., Исмоилов Э.А., Худойназарова Д.Х. Уравнения крутильных колебаний слоистых цилиндрических вязкоупругих оболочек и стержней // Научно-технический журнал «Проблемы архитектуры и строительства», №2(2), 2020. – С.159-163. (05.00.00. №14).

11. Ялгашев Б.Ф., Косимова Ф.У. Приближенные уравнения крутильных колебаний трехслойной цилиндрической вязкоупругой оболочки // СамДУ илмий ахборотномаси, №3(121), 2020. – С.91-97. (01.00.00. №2).

12. Xudoynazarov X., Yalgashev B., Mavlonov T. Mathematical modelling of torsional vibrations of the three-layer cylindrical viscoelastic shell // IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.1030 012098 (2021) DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012098. (№ 3 Scopus).

13. Худойназаров Х., Yalgashev B. Longitudinal vibrations of a cylindrical shell filled with a viscous compressible liquid // E3S Web of Conferences 264, 02017. (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402017>. (№ 3 Scopus).

14. Khalmuradov R.I., Xudoynazarov X., Yalgashev B.F. Longitudinal-radial vibrations of a elastic cylindrical shell filled with a viscous compressible liquid // Tomsk State University. Journal of Mathematics and Mechanics. (2021), 69, 139-154. DOI: 10.17223/19988621/69/11. (№ 3 Scopus).

15. Ялгашев Б.Ф., Исмаилов Э., Худайбердиев З. Torsional Vibrations of Layered Cylindrical Viscoelastic Shells and Rods // AIP Conference Proceedings 2637, 030023 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0118588> Published Online: 20 October 2022. (№ 3 Scopus, IF=0.189).

16. Ялгашев Б.Ф., Худойназарова Д., Исраилов Ш. Boundary Value Problems of Dynamics of Three-Layer Cylindrical Elastic Shells // AIP Conference Proceedings 2637, 030019 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0118592>. (№ 3 Scopus, IF=0.189).

17. Khalmuradov R.I., Yalgashev B.F., Ahatov Kh. Refined Equations of Torsional Vibrations of a Three-Layer Cylindrical Viscoelastic Shell // AIP Conference Proceedings 2637, 030026 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0121480>. (№ 3 Scopus, IF=0.189).

18. Ялгашев Б.Ф., Худойназарова Д., Гадаев А. Torsional vibrations of a three-layer circular cylindrical elastic shell // AIP Conference Proceedings 2637, 030025 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0121494>. (№ 3 Scopus, IF=0.189).

II bo‘lim (II часть; II part)

19. Худойназаров Х., Ялгашев Б. Нестационарные крутильные колебания трехслойной цилиндрической вязкоупругой оболочки // Материалы международной научно-технической конференции «Прочность конструкций, сейсמודинамика зданий и сооружений», 12-14 сентября 2016. Ташкент – 2016.

20. Ялгашев Б., Шомирзаев Г. Уч қатламли композит цилиндрлик қобик буралма тебранишлари Сореманне састояния и переспективасы развита строителной механика на основе компьютерных технологий и моделирования // Материалы международной научно-технической конференции, 16-17 июня 2017 г. Самарканд, с. 356-361.