

BUXORO MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH

TOSHKENT KIMYO – TEXNOLOGIYA INSTITUTI

MIRZAKABILOV BEKZOD NARKUZIYEVICH

QOVUSHQOQ-ELASTIK MUHITDAGI SUYUQLIKLI QUDUQLARDA
TO'LQIN TARQALISHI VA DINAMIK KUCHLANISH-DEFORMATSIYA
HOLATI

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Buxoro – 2025

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

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

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on physical-
mathematical sciences**

Mirzakabilov Bekzod Narkuziyevich

Qovushqoq-elastik muhitdagi suyuqlikli quduqlarda to'lqin tarqalishi va
dinamik kuchlanish-deformatsiya holati..... 3

Мирзакабилов Бекзод Наркузиевич

Распространение волн в вязкоупругих скважинах с жидкостью и
динамическое напряженно-деформированное состояние..... 21

Mirzakabilov Bekzod Narkuzievich

Wave propagation in viscoelastic fluid wells and dynamic stress-strain
state..... 39

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works..... 43

**BUXORO MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

TOSHKENT KIMYO – TEXNOLOGIYA INSTITUTI

MIRZAKABILOV BEKZOD NARKUZIYEVICH

**QOVUSHQOQ-ELASTIK MUHITDAGI SUYUQLIKLI QUDUQLARDA
TO'LQIN TARQALISHI VA DINAMIK KUCHLANISH-DEFORMATSIYA
HOLATI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Buxoro – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.4.PhD/FM1169 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent kimyo-texnologiya institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Buxoro muhandislik-texnologiya institut veb-saytida (www.bmti.uz) va "ZiyoNet" Axborot ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar :

Safarov Ismoil Ibroximovich

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Mavlonov To'liqin Mavlonovich

texnika fanlari doktori, professor

Xusanov Baxtiyar Ergashbayevich

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti

Dissertatsiya himoyasi 2025 yil 5 aprel kuni soat 11⁰⁰ da Buxoro muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 raqamli Ilmiy kengash majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100118, Buxoro shahar, Qayum Murtazoyev ko'chasi 15 uy. Tel.: (+998-65) 223-78-84; faks: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz).

Dissertatsiya bilan Buxoro muhandislik-texnologiya institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ 458 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100118, Buxoro shahar, Qayum Murtazoyev ko'chasi 15 uy. Tel.: (+99865) 223-78-84).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil 14 mart kuni tarqatildi.

(2024 yil 13 dekabr № 11 raqamli reyestr bayonnomasi).



M.X. Teshayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi,
fizika-matematika fanlari doktori (DSc)

Z.I. Boltayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy
kotibi, fizika-matematika fanlari doktori
(DSc), professor

M.Z. Sharipov

Ilmiy kengash huzuridagi Ilmiy darajalar
beruvchi Ilmiy seminar raisi, fizika-
matematika fanlari doktori (DSc), professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda yer osti foydali qazilmalar - neft va gazni qazib olishda quduqning yaqin atrofi va quduq qoplamalarining mustahkamligi holatini baholash hamda mustahkamligini oshirish muammolarini yechishda takomillashgan hisoblash usullarini qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida burg'ulash o'qi bo'ylab tarqalaladigan to'lqin amplitudasining chuqurlik oshishi bilan susayishini hisobga olib quduq atrofi elastik xossalarni o'rganishda akustik to'lqinlarning tarkalishi nazariyasiga asoslangan to'lqin yuklanish dinamikasini tadqiq qilish va baholashning yangi usullarini amalyotga joriy etishni taqazo etadi. Shu jihatdan foydali qazilmalar – neft va gazni qazib olishda quduqlarning mustahkamligini ta'minlash, quduq qoplamalarida hosil bo'ladigan dinamik kuchlanish va deformatsiyalarni ruxsat etilgan chegarada kamaytirish, zo'riqishlar yigilishinining eng kichik holatda taqsimlanishini ta'minlovchi ishonchli hisoblash usullarini ishlab chiqish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda yer osti inshootlari sohasida qo'llaniladigan materiallarning, shu jumladan ko'p qatlamli murakkab fizik xossalarga ega bo'lgan va muhit bilan aloqada bo'lgan kompozit materiallardan yasalgan silindrik qobiqning mustahkamligini tadqiq qilishga takomillashgan samarali usullarini ishlab chiqishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, silindrik ko'rinishdagi suyuqlikli qobiqlarning qovushqoq-elastiklik xususiyatini hisobga olib, kuchlanish-deformatsiya holatini aniqlashning takomillashgan va soddalashtirilgan matematik modellarini samarali hisoblash usullarini yaratishga va rivojlantirishga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda qurilish va texnika sohasida turli dinamik yuklanishlar ta'siri ostida bo'lgan to'ldiruvchili qovushqoq-elastiklik silindrik qobiqlarning kuchlanish-deformatsiya holatini topish metodikasi va algoritmini yaratish, hamda amaliyotga tadbiiq etish chora-tadbirlarini ishlab chiqish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmonida, jumladan, "...hududlarning "o'sish nuqtalari"dan kelib chiqib, muhandislik-kommunikatsiya va ijtimoiy infratuzilma obyektlarini qurishga alohida e'tibor qaratish..."¹ bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, sanoati rivojlangan mamlakatlarda yer osti maxsus qurilish konstruksiyalarining mustahkamligi va raqobatbardoshligini ta'minlash uchun takomillashtirilgan matematik modellarini, samarali hisoblash usullarini ishlab chiqish, maxsus kompozit qoplamali inshootlarga seysmik to'liqinta'siri muammosining ilmiy asoslarini o'rganish, nazariyasini rivojlantirish, ilmiy asosini takomillashtirish, hamda hisoblashning samarali usullarini ishlab chiqish uchun mazkur yo'nalishlarda maqsadli ilmiy tadqiqotlarni amalga oshirish, yer osti va yer usti inshootlaridagi seysmodinamik jarayonlarni o'rganish, tahlil qilish va bu turdagi murakkab masalalarni sonli usullar bilan yechish, hamda algoritmlarini ishlab

¹O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni

chiqish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 30 maydagi PF-144-sonli “O‘zbekiston Respublikasi seysmik xavfsizligini ta’minlash tizimini yanada takomillashtirish chora tadbirlari to‘g‘risida”gi Farmoni, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-maydagi PQ-158-sonli “O‘zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta’minlash tizimini yanada takomillashtirishga oid qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi qarori, 2024 yil 17 apreldagi PQ-161-sonli “Bino va inshootlarning zilzilabardoshlilikini oshirish, hamda seysmik xavfni monitoring qilish faoliyatini takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarori, hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa meyoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishdga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari taraqqiyotining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining IV. “Matematika, mexanika va informatika” ustuvor yo‘nalishiga mos ravishda bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xalqaro ilmiy tadqiqotlar sharhi.

Qovushqoq-elastik muhitdagi suyuqlikli quduqlarda to‘lqintarqalishi va dinamik kuchlanish-deformatsiya holati bo‘yicha ilmiy tadqiqot ishlari xorijiy mamlakatlarning ko‘plab ilmiy markazlarida olib borilmoqda, jumladan, AQSh (Nyu-York shtati; Texas universiteti, Ostin, Texas shtati; Ogayo universiteti, Afina, Ogayo shtati Evanston shimoli-sharqiy universiteti, Illinoys shtati; Kornelya universiteti, Itaka.), Eron (Tehron universiteti, Tehron), Rossiya (N.G. Chernishevskiy nomidagi Saratov davlat universiteti, Tomsk politexnika universiteti, Sankt-Peterburg texnika universiteti, Moskva elektron mashinalar instituti (texnika universiteti), Perm davlat universiteti, Moskva davlat universiteti, Fanlar akademiyasining Novosibirsk bo‘limi va boshqalar), Hindiston (R.Gandi nomidagi texnika universiteti, Bxopal; Texnologik universitet, Kanpur), Ukraina (Gidromexanika instituti Ukraina milliy fanlar akademiyasi (UMFA), S.P. Timoshenko nomidagi mexanika instituti UMFA, Kiyev), Belorussiya (Belorus davlat universiteti, Minsk), Braziliya (Rio-de-Janeyro katolik universiteti), Armaniston (Mexanika instituti MFA Armaniston), Angliya (Oksford universiteti), Ozarbayjon (Ozarbayjon milliy fanlar akademiyasining «Fizika va matematika fanlari»), Qozog‘iston (A.Yassaviy nomidagi Qozoq-turk xalqaro universiteti, Turkiston shahri), kabi davlatlarni ko‘rsatish mumkin. Ushbu tadqiqot markazlarida inshootlarning deformatsiyalanuvchan xususiyatlarini e‘tiborga olib o‘rganishga katta e‘tibor qaratilib kelinmoqda.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Qovushqoq-elastik muhitdagi suyuqlikli quduqlarda to‘lqintarqalishi va dinamik kuchlanish-deformatsiya holati bo‘yicha ilmiy tadqiqot ishlari quyidagi taniqli chet el olimlari tomonidan o‘rganilgan: Ilyushin A.A., Brexovskix L.V., Viktorov I.A., Gorshkov A.G., Volmir A.S., Genkin M.D., Shemyakin Ye.I., Guz A.N., Grinchenko V.T., Komissarova G.L., Nigul U.K., Gogoladze V.G, Mitra R., Kolskiy G., Uayt, Axenbax J.D., Shafer B.V., Troyanovskiy I.Ye., Kiyko I.A., Molotkov L.A., Novichkov Y.I., Molotkov L.A., Petrashen G.I., Krauklis P.V., Slepyan L.I., Frolov K.V., Antonov A.N.,

Matveyenko V.P., Shardakov I.N., Starovoytov E.I., Anofrikova N.S., Miker T., Meytsler A., Deyvis R.M., San R.I. va boshqalar.

Bu muammoni yechishda O‘zbekiston olimlari O‘rozboyev M.T., Shirinulov T.Sh., Raxmatulin X.A., Kabulov V.K., Rashidov T.R., Muborakov Y.N., Mardonov B.M., Sultanov K.S., Mamatqulov Sh.M., Mirsaidov M.M., Badalov F.B., Xojmetov G.X., Ishanxodjayev A.A., Mavlonov T.M., Abdusattorov A.A., Safarov I.I., Xudaynazarov X.X., Xusanov B.E., Teshayev M.X., Bozorov M.B., Eshmatov X., Yuldashev Sh.S., Abduqodirov S.A., Usarov M.K. va boshqalar o‘z hissalarini qo‘shib kelishmoqda. Ularning ishlarida materiallarning reologik xususiyatlarini hisobga olib, yer osti silindrik va sferik formadagi inshootlarning dinamik xususiyatlarini xarakterlovchi parametrlarni hisoblash usullarini rivojlantirishgan. Yuqoridagilarga qaramay hozirgi vaqtda o‘z yechimini topmagan bir qator muammolar mavjud. Yer osti maxsus inshootlarning dissipativ bir jinsli bo‘lmagan xususiyatlarini hisobga olib dinamik jarayonlarni o‘rganishda deformatsiyalanuvchan qattiq jismlar mexanikasi usullaridan foydalanish bu sohada amaliy ahamiyatga ega bo‘lgan ko‘pgina muammolarni yechishga imkon yaratadi.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqot ishlari Toshkent kimyo – texnologiya institutida 2017 - 2026 yillarda bajarilgan ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining “Matematikaning ilmiy va amaliy muammolari” mavzusidagi ilmiy-texnikaviy dasturi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi deformatsiyalanuvchi muhitda joylashgan vertikal quduq formasidagi maxsus inshootga noturg‘un va garmonik yuklanish ta’sirida hosil bo‘ladigan kuchlanganlik-deformatsiya holatini o‘rganishning matematik modelini qurish, masalalarni yechish metodikasi va algoritmlarini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

qovushqoq - elastik fazoda joylashgan silindrik qobiq bilan mustahkamlangan suyuqlikli vertikal quduq o‘qiga burchak ostida tushuvchi bo‘ylama yoki ko‘ndalang to‘lqinlar ta’siri natijasida hosil bo‘ladigan dinamik kuchlanganlik - deformatsiya holatini topish masalasini matematik qo‘yilishi, yechish usuli va algoritimini ishlab chiqish;

qovushqoq - elastik fazoda joylashgan silindrik qobiq bilan mustahkamlangan suyuqlikli vertikal quduq xos tebranishlarini o‘rganish usullari va algoritimini ishlab chiqish;

quduqlarda seysmik to‘lqinta’siridagi quvur to‘lqinining hosil bo‘lishini o‘rganish usuli va algoritmini ishlab chiqish;

chuqur joylashgan qatlamli quduqqa ko‘ndalang va bo‘ylama to‘lqinlar yuklanganda kuchlanganlik - deformatsiya holati va zo‘riqlishlarga solishtirma baho berish.

Tadqiqotning obekti sifatida vertikal (yoki suyuqlikli) quduq olingan.

Tadqiqotning predmetini uzun fazoviy silindrik ko‘rinishdagi suyuqlikli quduqqa bo‘ylama (yoki ko‘ndalang) to‘lqintushishi yoki ta’siri va difraksiyasi natijasida qovushqoq-elastik quduq qoplamalaridagi dinamik kuchlanishlar-deformatsiya holatini aniqlash nazariyasi bo‘yicha yechish usullarini rivojlantirish

tashkil etadi.

Tadqiqot usullari Tadqiqot jarayonida qovushqoq elastiklik nazariyasining ko'chishlar orqali ifodalangan operator koeffisientli Lamé tenglamasi orqali olingan xususiy hosilali integro–differensial tenglamalarini yechish uchun deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi va matematik fizikaning maxsus funksiyalari orqali yechimini topish, Myuller va Furyening integral almashtirishlari, Gauss usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

qovushqoq–elastik suyuqlikli mustahkamlangan va mustahkamlanmagan quduqda xos to'liq tarqalishi masalasi to'liq dinamikasining usullari asosida xos chastotalari, to'liq uzunligi, faza tezligi va guruh tezliklari munosabatlarini ifodalovchi kompleks parametrli dispersion tenglama olingan va uni sonli yechish algoritmi ishlab chiqilgan;

qovushqoq–elastik muhitdagi mustahkamlangan va mustahkamlanmagan quduqqa garmonik to'liqlar yuklanganda, hosil bo'ladigan dinamik kuchlanganlik-deformatsiya holatini topish metodikasi va algoritmi qovushqoq–elastiklik nazariyasining usullari asosida ishlab chiqilgan;

qovushqoq–elastik suyuqlikli quduqlarda klassik to'liqlardan tashqari quvur va suyuqlik to'liqlari mavjud bo'lishi kompleks faza tezligi va chastotalarni limit qiymatlarini hisoblash asosida topilgan;

qovushqoq–elastik suyuqlikli quduqlarga yuklanuvchi garmonik to'liqlar yuklanish burchagiga, quduq qoplamasi va muhit bikrlilari nisbatiga, to'liq uzunligiga va muhitning reologik parametrlariga bog'liq bo'lishi sonli hisoblashlar asosida topilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

ko'p qatlamli mustahkamlangan suyuqlikli quduqlarda garmonik (uzun va qisqa) to'liqintushishi natijasida yuzaga keladigan dinamik kuchlanish-deformatsiya holatini topish va quduqlarning mustahkamligini hisoblash metodikasi ishlab chiqilgan;

ko'p qatlamli mustahkamlangan suyuqlikli quduqlar uchun spektral masalada qo'yildi va chekli sondagi kompleks rezonans chastotalarini topish yechilgan;

ko'p qatlamli suyuqlikli quduqlar uchun limit quvur va gidroto'liqlar mavjud bo'lishi hamda ularni so'nish qonuniyatlari topilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi chegaraviy masalalarning korrekt qo'yilishi, keltirib chiqarilgan matematik munosabatlarning va tenglamalarning analitik metodlar bilan olinganligi, hamda sonli hisoblashlar yuqori aniqlikdagi sonli usullardan foydalanib olinganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati qovushqoq–elastik muhitda joylashgan suyuqlikli mustahkamlangan quduqlarda xos to'liq tarqalishi va so'nishini o'rganish natijasida quvur va gidroto'liqlarni hamda ular orasida faza to'liqlarni mavjudligini topilishi, ularning geometrik va fizik–mexanik parametrlarga bog'liq o'zgarishini baholanishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot ishining amaliy ahamiyati qovushqoq–elastik muhitda joylashgan suyuqlikli mustahkamlangan aniq parametrlarga ega quduqlarda xos

to'ldinchastotalarini topilishi, quduq va uni o'rab turuvchi muhitda hosil bo'ladigan rezonans xodisalarini fizik-mexanik parametrlarga bog'liq o'zgarishini baholanishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Dinamik kuchlar ta'sirida elastik va qovushqoq-elastik tekisliklarda joylashgan silindrik qobiqlarning dinamik kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini hisoblash usullari tadqiqot ishi bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

geofizikada to'lqin tarqalish masalalarini yechish uchun ishlab chiqilgan yangi optimal algoritmlar va dasturiy vositalaridan hamda silindrik qobiqsimon bosim ostida ishlovchi quvurlar bilan muhitning o'zaro ta'sirini hisobga olish masalalarini yechish usullaridan Qarshi davlat universiteti 2018-2020-yillarda bajarilgan OT-Atex-2018-340 raqamli "Ikki tezlikli muhit dinamikasining amaliy geofizik masalalarini nazariy va sonli tadqiq etish" fundamental loyahasida foydalanilgan (Qarshi davlat universitetining 2024-yil 10-oktabrdagi № 04/3300 -sonli ma'lumotnomasi). Natijada qovushqoq-elastik suyuqlikli quvurlar tebranishining rezonans amplituda sohalari oldindan baholash imkonini bergan;

qovushqoq-elastik muhitda joylashgan suyuqlikli quduqlarning dinamik kuchlar ta'siridagi tebranish va difraksiya masalalarini sonli yechish usullaridan Toshkent kimyo-texnologiya institutining 2016-2020-yillarda bajarilgan OT-F4-01 "Qovushqoq suyuqlik oquvchi ko'p qatlamli kompozit quvurlar egri chiziqli bo'laklarining harorat va dinamik yuklanishlar ta'sirida chiziqli bo'lmagan dinamik kuchlanish deformatsiya holatini o'rganish usullarini ishlab chiqish va nazariyasini rivojlantirish" mavzusidagi fundamental loyihada foydalanilgan (Toshkent kimyo-texnologiya institutining 2024-yil 13-noyabrdagi № 1/01-2896-sonli ma'lumotnomasi). Natijada silindrik konstruksiyalarning dinamik holatini baholashda sistemada hosil bo'ladigan energiya dissipatsiyasini hisobga olish imkoniyati yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 17 ta ilmiy-amaliy anjumanlarda, jumladan 9 ta xalqaro anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 37 ta ilmiy ish chop etilgan, jumladan, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktorlik (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 10 ta maqola, shu jumladan, 2 tasi xorijiy va 8 tasi respublika jurnallarida nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish qismi, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 120 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya tadqiqotining dolzarbligi va zaruriyati asoslab berilgan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obykti va predmetlari shakllantirilgan. Tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon etilgan. Olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan,

ularning ilmiy va amaliy ahamiyatlari yoritilgan. Tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etilishi, ishning aprobatsiyasi, chop etilgan ishlar, dissertatsiya tuzilishi va hajmi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Qovushqoq-elastik muhitdagi suyuqlikli quduqlarda to'lqin tarqalishini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili va masalaning qo'yilishi**» deb nomlangan birinchi bobida, xos to'lqinva garmonik to'lqinlar ta'sirida chuqur o'rnatilgan ko'ndalang kesimi turlicha bo'lgan quduqlarning kuchlanganlik - deformatsiyalanganlik holatini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlarning qisqacha tahlili keltirilgan, hamda adabiyotlar tahlili asosida xulosalar qilingan. Bu bob uch paragrafdan iborat. Birinchi paragrafi "Foydali qazilmalar quduqlarga to'lqinlarning ta'sirini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili" deb nomlanadi. Unda seysmik zonada gruntli muhitda joylashgan silindrsimon qobiqlar, quvur o'tkazgichlarining tuzilmalari, metro tunnellari, gaz omborlari va boshqa yer osti inshootlarini zilzilabardoshligini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili qisqacha keltirilgan. Bu bobning ikkinchi paragrafi "Ko'p qatlamli qovushqoq-elastiklik muhitlardan tashkil topgan to'lqino'tkazgichlarga to'lqintarqalishini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili" deb nomlangan. Seysmik hududlarda quduqlarni loyihalashning asosiy maqsadi zilzila zo'riqishlariga bardosh beradigan, xavfsiz va tejamkor bo'lgan va shu bilan birga boshqa tabiiy va texnogen xavf-xatarlarga qarshi kurashda qo'llaniladigan yechimlarga mos keladigan konstruksion yechimlarni ishlab chiqishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili keltirilgan. Uchinchi paragraf "Deformatsiyalanuvchi muhitda joylashgan bo'lakli bir jinsli suyuqlikli silindrik jismdagi to'lqinlarning difraksiyasini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili" deb nomlanadi. Unda seysmik yuklanishlarning yupqa devorli tunnellarni hisoblashga bag'ishlangan adabiyotlar tahlil etilgan. Ularni hisoblashda fazoviy holatini hisobga olish va hisoblash usullarini takomillashtirish zarurligi ko'rsatib o'tilgan.

Dissertatsiyaning «**Ko'p qatlamli quduq qoplamalarida so'nuvchi to'lqinlarning tarqalishi va to'lqiny uklanishi masalalarining qo'yilishi va yechish usullari**» deb nomlangan ikkinchi bobida ko'p qatlamli quduq qoplamalarida so'nuvchi to'lqinlarni tarqalish va to'lqinyuklanishi masalalarining qo'yilishi va yechish usullari keltirilgan. Seysmik to'lqinta'siridagi qovushqoq elastik muhitdagi mustahkamlangan quduqning kuchlanganlik – deformatsiya holatini topish va tahlil qilish muammosining qo'yilishi ko'rib chiqilgan. Quduqni qoplamasi yupqa silindrik qobiqlar uchun Krixgof-Lyav gipotezasi yoki Timoshenko S.P. gipotezasi o'rinli bo'ladi. Qobiqning harakat differensial tenglamasi, qalin silindrlar uchun deformatsiyalanuvchan jismlar mexanikasining qovushqoq-elastik nazariyasining tenglamalaridan foydalanilgan. Bu holda ko'p qatlamli qobiq (yoki qalin devorli silindr) lardan tashkil topgan mexanik sistemaning harakat tenglamalari quyidagicha bo'ladi

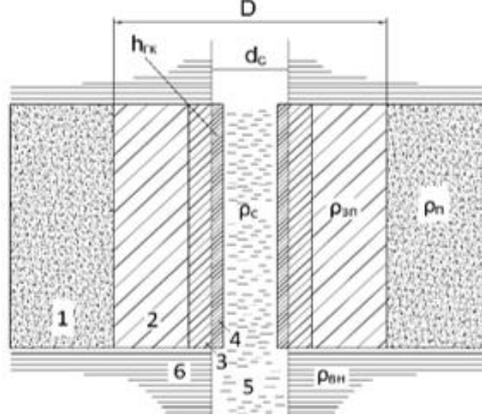
$$(\tilde{\lambda}_j + 2\tilde{\mu}_j) \text{grad div } \vec{u}_j - \tilde{\mu} \text{rotrot } \vec{u}_j + \vec{b}_j = \rho_j \frac{\partial^2 \vec{u}_j}{\partial t^2}, (j=1, 2, \dots, N). \quad (1)$$

Agar mexanik sistema silindrik qobiqlardan tashkil topgan bo'lsa, u holda uning harakat differensial tenglamasi quyidagicha bo'ladi

$$L\tilde{E}\tilde{u} = \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0 h_0} \tilde{p} + \rho_0 \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0} \left(\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} \right), \quad (k=1,3\dots N-1) \quad (2)$$

$$\Delta\varphi_0 - \frac{1}{c_\infty^2} \ddot{\varphi}_0 = 0. \quad (3)$$

Agar silindrik qatlam qovushqoq suyuqlik bilan to'ldirilgan bo'lsa, u holda Nave - Stoks tenglamasidan foydalaniladi.



1-rasm. Deformatsiyalanuvchi muhitda joylashgan ko'p qatlamli suyuqlik quduqqa to'liqin yuklanishining hisob sxemasi

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

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

$$r = a_k : \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)}; \quad \sigma_{rz k} = \sigma_{rz(k+1)}; \\ u_k = u_{k+1}; \quad v_k = v_{k+1}; \quad w_k = w_{k+1}. \quad (4)$$

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

$$r = a_k : \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{rz k} = 0; \\ \sigma_{r\theta(k+1)} = \sigma_{rz(k+1)} = 0; \quad w_k = w_{k+1}. \quad (5)$$

3. Agar $r = a_1$ birinchi qatlam suyuqliksiz yoki to'ldiruvchisiz bo'lsa, u holda kuchlanishlardan ozod bo'lish sharti qo'yiladi

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

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

$$r = a_k : \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)}; \\ \sigma_{rrk} = \bar{k}_r (u_{rk} - u_{r(k+1)}); \\ \sigma_{r\theta k} = \bar{k}_\theta (u_{\theta k} - u_{\theta(k+1)}). \quad (7)$$

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

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

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r\psi = \text{const} , \quad \lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} - ik_2\psi \right) = 0 \quad (8)$$

muhitda tarqalayotgan silindrik to'liqlar tekis deformatsiya holati uchun quyidagicha bo'ladi

$$\varphi_N^{(p)} = \varphi_0 i\pi \sum_{n=1}^{\infty} [(-1)^n E_n J_n(\alpha_N r) H_n^{(1)}(\alpha_N z)] \cos n\theta e^{-i\omega t} , \quad (8.1)$$

to'ldiruvchili silindrik qobiq va uni o'rab turuvchi muhitning xususiy hosilali differensial tenglamasini ko'chish vektorini bo'ylama va ko'ndalang to'liqpotensiallari orqali ifodalaymiz

$$\vec{u}_j = \text{grad}\phi_j + \text{rot}\vec{\psi}_j , \text{div}\vec{\psi} = 0 , \quad (9)$$

asosiy masalalar elastiklik nazariyasining tekis deformatsiya holati masalasiga olib kelinadi. Shuning uchun $\vec{\psi}_j(\psi_{zj}, 0, 0)$ bo'ylama va ko'ndalang to'liqpotensiallari quyidagi integro-differensial tenglamalarini qanoatlantiradi

$$\Gamma_{\lambda\mu\kappa} \nabla^2 \varphi_k - \frac{1}{c_{p0k}^2} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial t^2} = 0 ; \quad \Gamma_{\mu\kappa} \nabla^2 \psi_z - \frac{1}{c_{s0k}^2} \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial t^2} = 0 ; \quad (10)$$

$$\phi_j = \sum_{n=0}^{\infty} [A_{nj} H_n^{(1)}(\alpha_j r) + A'_{nj} H_n^{(2)}(\alpha_j r)] \cos n\theta e^{-i\omega t} ;$$

$$\psi_j = \sum_{n=0}^{\infty} [B_{nj} H_n^{(1)}(\beta_j r) + B'_{nj} H_n^{(2)}(\beta_j r)] \sin n\theta e^{-i\omega t} ; \quad j = 1, 2, \dots, N-1$$

$$\phi_N = \sum_{n=0}^{\infty} [C_{nN} H_n^{(1)}(\alpha_N r) + D_{nN} H_n^{(2)}(\alpha_N r)] \cos n\theta e^{-i\omega t} , \quad (11)$$

$$\psi_N = \sum_{n=0}^{\infty} [M_{nN} H_n^{(1)}(\beta_N r) + L_{nN} H_n^{(2)}(\beta_N r)] \sin n\theta e^{-i\omega t} ,$$

$$\phi_0 = \sum_{n=0}^{\infty} [K_{n0} J_n(\alpha_0 r) + K'_{n0} N_n(\alpha_0 r)] \cos n\theta e^{-i\omega t} ,$$

Bunda n -butun son; ω -erkin tebranish masalasi o'rganilganda kompleks chastota, majburiy tebranish o'rganilganda haqiqiy kattalik deb olinadi.

Bunda $A_{nj}, A'_{nj}, B_{nj}, B'_{nj}, C_{nj}, D_{nj}, L_{nN}, M_{nN}, K_{nN}$ va K'_{nN} – ixtiyoriy o'zgarma kattaliklar, bo'lib chegaraviy shartlardan topiladi; $H_n^{(1)}(\alpha_j r)$ va $H_n^{(2)}(\alpha_j r)$ – mos ravishda Bessel va Xankel funksiyalari $H_n^{(1),(2)}(\alpha r) = J_n(\alpha r) \pm iN_n(\alpha r)$. Agar muhitda tekis formadagi to'liqintarqalsa, u holda kuchlanish amplitudasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi. Ixtiyoriy o'zgarmlarni topish uchun chegaraviy shartlar (4) - (7) dan foydalansak bir jinsli bo'lmagan kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalar sistemasini olamiz

$$[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)] \{q\} = \{P_1\} , \quad (12)$$

bunda $\{q\}$ -vektor stolbets bo'lib ixtiyoriy o'zgarmlardan tashkil topgan; $\{R\}$ -tashqi tushadigan to'liqinta'siridagi vektor; $[C_1]$ - kvadrat matritsa, elementlari Bessel

va Xankel funksiyalaridan tashkil topgan. Kontur kuchlanishi $\sigma_{\theta\theta}$ ni hisoblash uchun

$$\sigma_{\theta\theta}|_{r=0} = (\text{Re} + iJ_m) e^{-i\omega t} = \sqrt{\text{Re}^2 + J_m^2} e^{-i(\omega t - \gamma)}, \gamma = \text{arctg} \frac{J_m}{\text{Re}} \quad (13)$$

Shunday qilib ikkinchi bobda garmonik to'liqinyuklanishi (va difraksiyasi) masalalarini yechishda ko'chishlar orqali ifodalangan Lamé tenglamasidan foydalanib, ko'chish potentsiallari orqali ifodalangan xususiy hosilali integro - differensial tenglamalar sistemasi olindi va analitik yechimni Gauss, Laplas va maxsus funksiyalar usullari asosida olish metodikasi va algoritmi ishlab chiqilgan.

Dissertatsiyaning «**Qovushqoq – elastiklik muhitdagi ko'p qatlamli silindrik quduqlarni xos tebranishlari va to'liqlarni tarqalishi**» deb nomlangan uchinchi bobida qovushqoq - elastik muhitda joylashgan (suyuqlikli) silindrik quduqlarlarni xos tebranishlari va to'liqlarni tarqalishi masalasi yechiladi. Birinchi masala sifatida qovushqoq - elastik muhitda joylashgan silindrik bo'shliqning xos tebranishlari masalasini ko'ramiz. Bo'shliq chegarasida kuchlanishlarni nol bo'lish sharti qo'yiladi. Agar kontakt va chegaraviy shartdan foydalanilsa, u holda kompleks koeffitsiyentli bir jinsli algebraik tenglamalar sistemasini olamiz. Bu bir jinsli tenglamalar sistemasi yechimga ega bo'lishi uchun, uning noma'lumlar oldidagi koeffitsiyentlardan tuzilgan asosiy aniqlovchi nolga teng bo'lishi kerak. Asosiy aniqlovchining elementlari kompleks parametr ω ning funksiyasi hisoblanadi. Faraz qilaylik qovushqoq elastiklik muhitda radiusi $r=1$ bo'lgan silindrik bo'shliq berilgan bo'lsin. U holda bo'shliq sirtida normal ($\sigma_{rr} = 0$) va urinma kuchlanishlarni ($\sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0$) nolga teng bo'lish sharti qo'yiladi. Bu shartdan foydalansak quyidagicha dispersion tenglamani olamiz:

$$\|c_{ij}\| = 0, i, j = 1, 2, 3. \quad (14)$$

Bunda

$$\begin{aligned} c_{11} &= (n^2 - 1 - \Omega^2 + \gamma_p^2) H_n^{(1)}(\alpha), \\ c_{12} &= (n^2 - 1 - \beta^2) H_n^{(1)}(\beta), \\ c_{13} &= 2(n^2 - 1) [\beta H_{n-1}^{(1)}(\beta) - n H_n^{(1)}(\beta)] - \beta^2 H_n^{(1)}(\beta), \\ c_{21} &= \alpha H_{n-1}^{(1)}(\alpha) - (n+1) H_n^{(1)}(\alpha), \\ c_{22} &= \beta H_{n-1}^{(1)}(\beta) - (n+1) H_n^{(1)}(\beta), \\ c_{23} &= (2n^2 + n - \gamma_p^2) H_n^{(1)}(\beta) - 2\beta H_{n-1}^{(1)}(\beta), \\ c_{31} &= \alpha H_{n-1}^{(1)}(\alpha) - n H_n^{(1)}(\alpha), \\ c_{32} &= (1 - \Omega^2 / 2\gamma_p^2) (H_{n-1}^{(1)}(\beta) - n H_n^{(1)}(\beta)), \\ c_{33} &= n^2 H_n^{(1)}(\beta). \end{aligned}$$

Bu (14) tenglama $n=1, 2, 3, \dots$ har bir qiymatida o'lchamsiz chastota Ω va to'liqintarqalish doimiysi γ_p va Puasson koeffitsiyenti orasidagi munosabatni ifodalaydi. Determinant ko'rinishida berilgan dispersion tenglama (14) n -chi tartibli Xankel funksiyasidan tashkil topgan. Maxsus funksiyalar (Xankel funksiyasi) kompleks argumentli bo'lib murakkab funksiyani tashkil etadi.

1-jadval.

Kompleks chastota haqiqiy qismining h/R ga bog'liq o'zgarishi

h/R	Xos sonlar (kompleks chastotaning haqiqiy qismi)				
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
1	0,07906	0,65168	1,50937	3,46217	5,43208
2	0,07472	0,43827	1,32169	2,86027	4,01843
3	0,06763	0,32809	0,97891	2,37612	4,21305
4	0,07672	0,23245	0,78271	1,58961	3,58168
5	0,12445	0,292026	0,53272	1,47858	3,30664

Kompleks parametrli chastota tenglamasi (14) Myuller usuli yordamida yechiladi. Bu transcendent tenglama (14) ni ildizlari ikki qismdan iborat. Haqiqiy ($\text{Re } \Omega$) va mavhum ($\text{Im } \Omega$) qismlar Kompleks chastotaning haqiqiy qismi mexanik sistemani tebranishlar chastotasini ifoda qilsa, mavhum qismi esa dempfirlash koeffitsiyentini ifodalay ekan (so'ndirish koeffitsiyenti). Hisoblash natijalari $n \geq 0$ ($\nu_1 = 0,25$) 1-jadvalda keltirilgan. Jadvaldagi natijalarni tahlilidan n ning ortib borishi bilan kompleks chastotaning haqiqiy va mavhum qismlari ham ortib borar ekan.

2-jadval

Natijalarni solishtirish ($\nu = 0,25$)

№ n	Dissertatsiya natijalari	Pao va Mao	Bnron va Parnes
0	0,44741-0.44420 i	0.44647-0.44127 i	0.4464-0.4410 i
1	1,09272-0,77653 i	1.09272-0.7653 i	1.0929-0.441 i
2	1,907554-0,89782 i	1.90754-0.8978 i	1.9076-0.897 i
3	2,75652-0,99151	2.75652-0.9915 i	
4	3,63132-1,06662 i	3.63132-1.0666 i	
5	4.52440-1.13140 i	4.52440-1.1314 i	

Chastota tenglamasi (14) faqat Puasson koeffitsiyentiga (ν) bog'liq bo'lar ekan. Puasson koeffitsiyentining qiymati $0 \leq \nu \leq 0,4$ oralig'ida o'zgarish topildi. Hisoblash jarayonida Bessel va Xankelning funksiyasining 5-6 hadi hisoblandi. Hisoblash aniqligi $10^{-8} - 10^{-6}$ bo'lganda to'xtatildi. Yadro relaksatsiyasi sifatida uch parametrli Rjanitsin – Koltunov yadrosi olindi ($A = 0,048; \beta = 0,05; \alpha = 0,1$)

$$R(t) = \frac{Ae^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}, \quad (15)$$

bunda A, α, β - yadro parametrlari. Natijalarni solishtirish ($\nu = 0,25$) 2-jadvalda keltirilgan. Agar muhitda joylashgan ko'p (k - chi) qatlamli silindrik qobiqlar ko'chishi Bessel va Neymanning n -chi tartibli kompleks argumentli funksiyalari orqali ifodalanadi.

$$u_{rk} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \gamma_k \left[A_{1kn} J'_n(\gamma_{1k} r) + A_{2kn} Y'_n(\gamma_{1k} r) \right] + \frac{n}{r} \left[A_{3kn} J_n(\gamma_{2k} r) + A_{4kn} Y_n(\gamma_{2k} r) \right] - \right. \\ \left. - \frac{r\gamma_{2k}}{\mu_{2k}} \left[A_{5kn} J'_n(\gamma_{2k} r) + A_{6kn} Y'_n(\gamma_{2k} r) \right] \right\} \cos n\phi e^{i(-\omega t + \gamma_p z)} \quad (16)$$

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

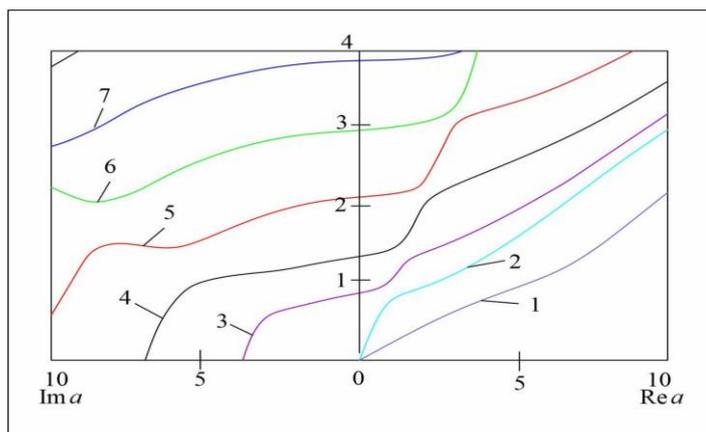
$$u_{zk} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \gamma_k \left[A_{1kn} J_n(\gamma_{1k} r) + A_{2kn} Y_n(\gamma_{1k} r) \right] + \frac{\gamma_{2k}^2}{n} \left[A_{5kn} J_n(\gamma_{2k} r) + A_{6kn} Y_n(\gamma_{2k} r) \right] \right\} \cos n\phi e^{i(-\omega t + \gamma_p z)},$$

bunda

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

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

Ixtiyoriy o'zgarishlarni topish uchun chegaraviy shartlardan foydalanamiz. U holda ixtiyoriy o'zgarishlarni topish uchun kompleks koeffitsiyentli bir jinsli algebraik tenglamalar sistemasini olamiz.



2-rasm. Chastotani kompleks to'liq soniga bog'liq o'zgarishi (n=0)

$$v_1 = 0, 2; v_0 = 0, 25; \rho^* = \frac{\rho_1}{\rho_0} = 1, 10; \mu = \frac{\mu_1}{\mu_2} = 0, 31; \gamma = \frac{c_{p1}}{c_{p2}} = 0, 7.$$

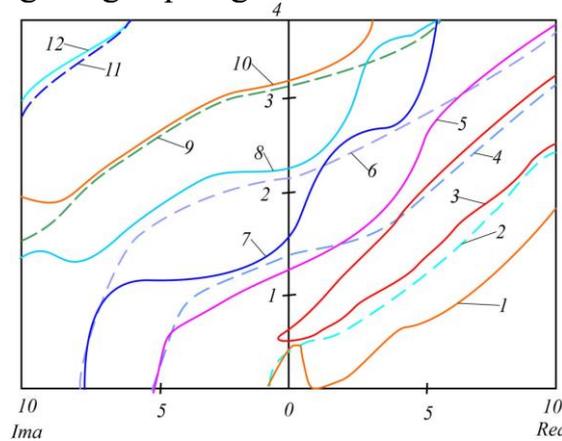
Bu sistema yechimga ega bo'lishi uchun, uning asosiy aniqlovchisi nolga teng bo'lishi kerak

$$\Delta(C, \omega, \gamma_p, \lambda) = 0. \quad (17)$$

Fazoviy $C = C_R + iC_I$ va guruh tezliklarni $V = V_R + iV_I$ to'liqsoni γ_p -ga bog'liq o'zgarishini topish uchun Myuller usuli asosida topiladi. Agar silindrik qatlam cheksiz muhitda joylashgan bo'lsa, sonli natijalar quyidagi berilganlar uchun olinadi.

Sonli natijalar quyidagi 2 va 3- rasmlarda chastotani kompleks to'liqsoniga bog'liq $n = 0$ va $n = 1$ uchun o'zgarishi ko'rinib turibdiki chastotalarning to'liqsoni

haqiqiy va mavhum qismiga bog‘liq o‘zgarishi monoton bo‘lishi topildi.



3-rasm. Chastotani kompleks to‘lqin soniga bog‘liq o‘zgarishi (n=1)

$$v_1 = 0,2; v_0 = 0,25; \rho^* = \frac{\rho_1}{\rho_0} = 1,10; \mu = \frac{\mu_1}{\mu_2} = 0,31; \gamma = \frac{c_{p1}}{c_{p2}} = 0,7$$

Faraz qilaylik qovushqoq - elastiklik cheksiz muhitda $r > a$ joylashgan quduq ($r \leq a, -\infty < z < \infty$) suyuqlik bilan to‘ldirilgan bo‘lsin (a -quduq radiusi, z -quduqning bo‘ylama o‘qi). Quyidagi belgilashlarni kiritamiz c_{p2} va c_{s2} mos ravishda quduqqa tarqaladigan bo‘ylama va ko‘ndalang to‘lqintezliklari, c_{p3} va c_{s3} mos ravishda quduqni o‘rab turgan muhitga tarqaladigan bo‘ylama va ko‘ndalang to‘lqintezliklari, c_1 - tovush to‘lqini tezligi, ρ_1 - suyuqlik zichligi. Oldingi boblarda keltirilganidek bu bobda ham harakat tenglamasi ko‘chish potentsiallari orqali yechiladi. Bular quduq qatlami uchun bo‘ylama φ_2 va ko‘ndalang ψ_2 , muhit uchun ham φ_3 va ψ_3 potentsiallar va φ_1 - bo‘ylama to‘lqinpotensial suyuqlik uchun. U holda harakat differensial tenglamalari ko‘chish potentsiallarda quyidagicha bo‘ladi

$$\frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial z^2} - \int_0^t R_{pj}(t-\tau) \nabla^2 \varphi_j(r,\tau) d\tau = \frac{1}{c_{pj}^2} \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial t^2} \quad (j=1,2,3),$$

$$\frac{\partial^2 \psi_k}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_k}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial z^2} - \int_0^t R_{sk}(t-\tau) \nabla^2 \psi_k(r,\tau) d\tau = \frac{1}{c_{sj}^2} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial t^2} \quad (k=2,3), \quad (18)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Bunda $R_{pj}(t-\tau), R_{sj}(t-\tau)$ - yadro relaksatsiyasi. Muhit va quduqning kontakt chegarasida ko‘chish va kuchlanishlarni tenglik yoki uzluksizlik sharti qo‘yiladi:

$$u_{r2} \Big|_{r=r_2} = u_{r3} \Big|_{r=r_2}, u_{z2} \Big|_{r=r_2} = u_{z3} \Big|_{r=r_2}, \tau_{rz2} \Big|_{r=r_2} = \tau_{rz3} \Big|_{r=r_2}, \sigma_{rr2} \Big|_{r=r_2} = \sigma_{rr3} \Big|_{r=r_2}, \quad (19)$$

$$u_{r1} \Big|_{r=r_1} = \frac{\partial u_{r2}}{\partial t} \Big|_{r=r_1}, u_{z1} \Big|_{r=r_2} = \frac{\partial u_{z2}}{\partial t} \Big|_{r=r_2}, \tau_{rz1} \Big|_{r=r_1} = 0.$$

Yuqorida keltirilgan integro-differensial tenglamani soddalashtirish maqsadida ‘muzlatish’ usulini qo‘llaymiz. Keyinchalik (18) munosabatni quyidagi ko‘rinishga almashtirib olamiz:

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_k f(t) &= \lambda_{0k} \left[1 - \Gamma_{\lambda k}^C(\omega_R) - i\Gamma_{\lambda k}^S(\omega_R) \right] f(t), \\ \bar{\mu}_k f(t) &= \mu_{0k} \left[1 - \Gamma_{\mu k}^C(\omega_R) - i\Gamma_{\mu k}^S(\omega_R) \right] f(t),\end{aligned}\quad (20)$$

$$\Gamma_{\lambda k}^C(\omega_R) = \int_0^{\infty} R_{\lambda k}(\tau) \cos \omega_R \tau d\tau, \quad \Gamma_{\mu k}^C(\omega_R) = \int_0^{\infty} R_{\mu k}(\tau) \cos \omega_R \tau d\tau,$$

$$\Gamma_{\lambda k}^S(\omega_R) = \int_0^{\infty} R_{\lambda k}(\tau) \sin \omega_R \tau d\tau, \quad \Gamma_{\mu k}^S(\omega_R) = \int_0^{\infty} R_{\mu k}(\tau) \sin \omega_R \tau d\tau,$$

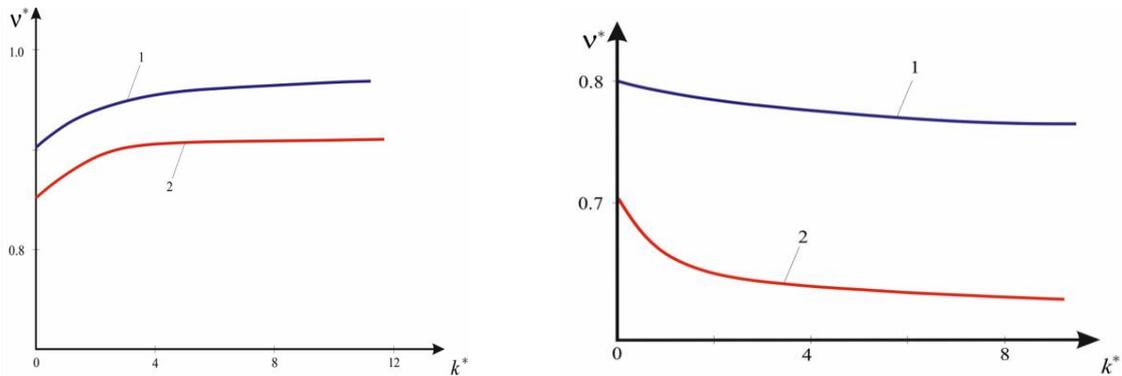
mos ravishda, Furrye yadro relaksatsiyasining kosinus va sinusi tasvirlari, ω_R - haqiqiy kattalik. Kompleks koeffitsiyentli xususiy hosilali differensial tenglamaning yechimini $r=0$ chegaralanganligi va cheksizlikda yechimni so‘nuvchi bo‘lishini e‘tiborga olsak, quyidagicha yozish mumkin $r = a$

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= A \cos kz I_0(k_\alpha r \alpha_1) \exp(ik_\alpha c_\phi t), \\ \varphi_2 &= [BI_0(k_\alpha r \alpha_2) + CK_0(k_\alpha r \alpha_2)] \cos kz \exp(ik_\alpha c_\phi t), \\ \psi_2 &= [DI_1(k_\alpha r \beta_2) + EK_1(k_\alpha r \beta_2)] \sin kz \exp(ik_\alpha c_\phi t), \\ \varphi_3 &= [LK_0(k_\alpha r \alpha_3)] \cos kz \exp(ik_\alpha c_\phi t), \\ \psi_3 &= [MK_1(k_\alpha r \beta_3)] \sin kz \exp(ik_\alpha c_\phi t).\end{aligned}\quad (21)$$

Bu yerda I_0, I_1, K_0, K_1 – modifitsirlangan Bessel funksiyasi; c_ϕ - fazoviy tezlik; $k_\alpha = 2\pi\omega / c_\phi$ – to‘lqinsoni; $\omega = \omega_R + i\omega_I$ – kompleks chastota;

$$\begin{aligned}\alpha_j &= \sqrt{1 - \gamma_j^2 m^2}, \quad \gamma_j = c_{s1} / c_{pj}, \quad \beta_j = \sqrt{1 - \delta_j^2 m^2}, \\ \delta_j &= c_{s1} / c_{sj}, \quad m = c_\phi / c_{s1}.\end{aligned}$$

Agar (21) yechimni (19) chegaraviy shartga qo‘yilsa, u holda A, B, C, D, E, L, M ixtiyoriy o‘zgarishlarni topish uchun 7 noma‘lumli bir jinsli 7 ta algebraik tenglamalardan tashkil topgan sistemani olamiz $\Delta\{X\} = 0$. Bu sistema noldan farqli, ya‘ni trivial bo‘lmagan yechimga ega bo‘lishi uchun asosiy aniqlovchisi nolga teng bo‘lishi kerak.



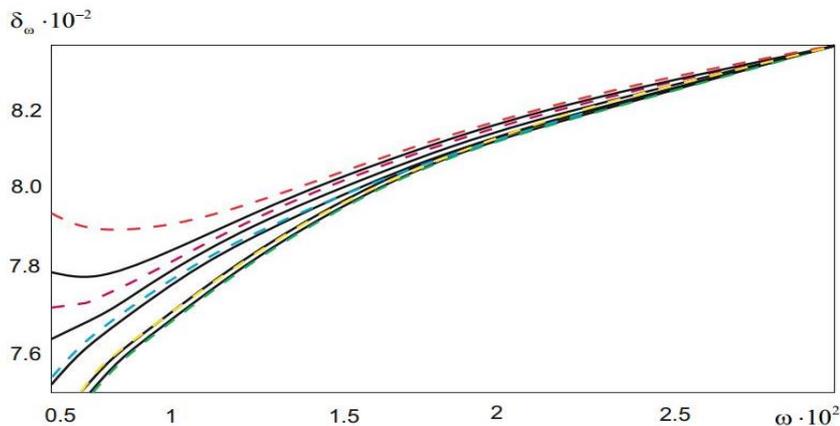
4-rasm. Faza tezligini to‘lqinsoniga bog‘liq o‘zgarishi:

$$c_{p1} = 1500m / c^2, c_{p2} = 4500m / c^2, \rho = \rho_1 / \rho_2 = 0.45, \gamma = 0.45(1), \gamma = 0.35(2)$$

5-rasm. Faza tezligini to‘lqinsoniga bog‘liq o‘zgarishi

$$c_{p1} = 1500m / c^2, c_{p2} = 4500m / c^2, \rho = \rho_1 / \rho_2 = 0.35, \gamma = c_{s2} / c_{p2}, \gamma = 0.70(1), \gamma = 0.60(2)$$

Sonli natijalar 4 va 5- rasmlarda keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki faza tezligi oshib borib yoki kamayib borib asimptotikaga intilar ekan. Faza tezliklarining haqiqiy qismlarini o‘zgarish xarakteri turlicha bo‘lar ekan. Faza tezliklarini mavhum qismi o‘zgarishi ham haqiqiy qismi xarakteriga o‘xshab ketadi. Lekin uning qiymati taxminan 10^{-2} songa farq qilar ekan. Suyuqlik qovushqoq - elastiklik xususiyatli devorga ega quduqda garmonik to‘lqinlarining tarqalishi va so‘nish xususiyatlari masalasining matematik qo‘yilishi va yechish metodikasi va algoritmi kompleks sohada qo‘yilmagan va yechilmagan.

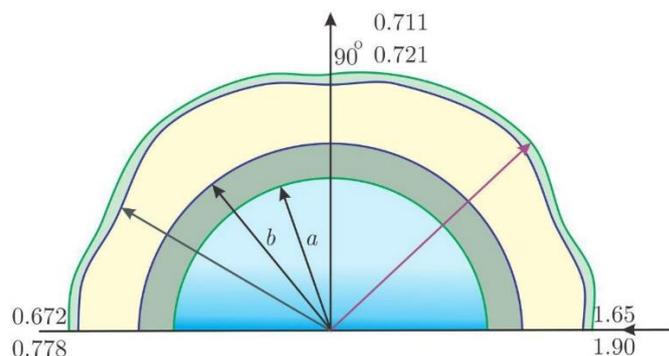


6-rasm. So‘nish dekrementini chastotaga bog‘liq o‘zgarishi

3.12-rasmda so‘nish tezligi koeffitsiyentining birinchi modasini $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ -bo‘lganda chastotaga bog‘liq o‘zgarishi keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki chastota ortishi bilan mos keluvchi so‘nish koeffitsiyenti ham oshib borar ekan. Shunday qilib uchinchi bobda mustahkamlangan va mustahkamlanmagan quduqlarning spektral masalasini yechish metodikasi va algoritmi asosida sonli natijalar tahlil qilindi.

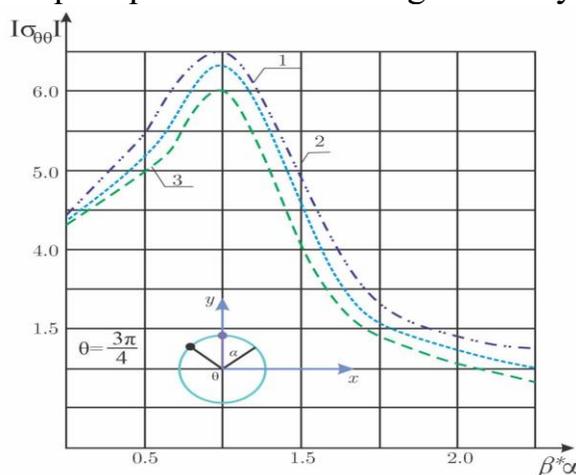
Dissertatsiyaning «Garmonik to‘lqinni qovushqoq–elastik muhitda joylashgan suyuqlik quduqqa ta’siri va difraksiyasi» deb nomlangan to‘rtinchi bobida qovushqoq - elastik muhitda joylashgan (suyuqlik) silindrik quduqqa garmonik (P va SV) to‘lqinni quduqqa ta’siri va difraksiyasi masalasi tekis va tekis bo‘lmagan (anti ploskiy) qo‘yilgan va analitik usul bilan yechilgan.

Muhit va mustahkamlangan quduqning tebranishlar tenglamasi ikkinchi bobda keltirilgan. Suyuqlik va suyuqliksiz silindrik qobiqdagi radial bosim natijasida hosil bo‘lgan kuchlanish epyurasi 7- rasmda tasvirlangan.



7-rasm. Suyuqlik va suyuqliksiz mustahkamlangan quduq kesmidagi radial kuchlanish epyurasi

7-rasmda suyuqlikli va suyuqliksiz mustahkamlangan quduq kesmidagi radial kuchlanish epyurasi tashqi silindr sirti uchun temir beton qobiq uchun keltirilgan. Kuchlanishlar to'liqintushish sohasida orqa tomonga qaraganda 2.4 martagacha ko'p bo'lishi topildi. Suyuqlik radial bosimni 15% oshirishi topildi. Olingan natijalardan kelib chiqadiki suyuqlik quduqni zilzilabardoshligini kamayishiga sabab bo'ladi



8-rasm. Suyuqlikli mustahkamlangan quduq kontur kuchlanishini to'liq soniga bog'liq o'zgarishi: 1 - elastik muhit ($A=0$). 2- $A=0,01$; $\beta=0,05$; $\nu=0,25$; $\alpha=0,1$ 3- $A=0,05$; $\beta=0,01$; $\nu=0,25$; $\alpha=0,1$.

Suyuqlikli mustahkamlangan quduq kontur kuchlanishini to'liqinsoniga bog'liq o'zgarishi 8-rasmda turli xil qovushqoqlik amplitudasi uchun keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki qovushqoqligining ortishi kuchlanishlarni 15 - 20% kamayishiga olib kelar ekan. Olingan sonli natijalar asosida to'liqintensivligining oshishi va quduq diametrining oshishi bilan kuchlanish quyidagicha o'zgarishi: diametri 1000 mm bo'lgan quduq qoplamalar uchun - 1,10 ... 1,20 marta, diametri 1500 mm dan bo'lgan quduq qoplamasi uchun - 1,20 ... 1,30 marta, diametri 1600 mm bo'lgan quvurlar uchun - 1,50 ... 1,60 marta kuchlanishlarning oshishi aniqlandi.

UMUMIY XULOSALAR

1. Qovushqoq - elastiklik muhitda joylashgan suyuqlikli quduqqa xos to'liqlarning tarqalishi, so'nishi va limit holatlarini o'rganish masalalarini yechish usullari, algoritmi va dasturi ishlab chiqildi.

2. Suyuqlikli qovushqoq - elastiklik silindrik quduq faza tezligini birinchi modasi, suyuqlikli elastiklik silindrik quduq faza tezligini birinchi modasi bilan 4-5% farqi bilan usma-ust tushishi topildi. Faza tezligining mavhum qismining o'zgarishi parametrlarga bog'liq monoton (o'suvchi yoki kamayuvchi) bo'lishi topildi.

3. Quduqda to'liqinyutilishi jarayoni yuz berishi, hamda faza tezligi yoki chastota kompleks kattalik bo'lishi tahlil qilindi. Dispersion tenglamani $Re m < 0$ yarim tekislikni chap bo'lagida kompleks ildizlari bo'lishi, hamda $Re m = 0$ o'qda faqat mavhum ildizlari bo'lishi topildi. Ildizlarni haqiqiy va mavhum qismining joylashuvi to'liqinsoniga bog'liq bo'lishi aniqlandi.

4. Xos to'liqlar (normal to'liqlar) dispersion tenglamalari so'nuvchi tebranishlarga mos kelishi topildi. Bu ildizlarni haqiqiy qismi tebranishlar chastotasi yoki faza tezligini ifodalasa, mavhum qismi dekrement zatuxaniya yoki so'nish

koeffitsiyentini ifodalanishi aniqlandi.

5. Chastotaning limit qiymatida (nolga intilganda) Gidoto'lqinmavjudligi topildi. Chastota cheksizlikka intilishi, suv to'lqini hosil bo'lishi topildi. Qovushqoq -elastiklik muhitdagi quduq uchun bu to'lqinlarning faza tezliklari kompleks kattalik bo'lishi aniqlandi.

6. Chastotaning yuqori modalarda otsechka hodisasi ro'y berishi bilan xarakterlanishi aniqlandi. Lekin ularni har bir modasini chegarasi mavjud bo'lishi topildi. Ulardan tashqarida yoki kichik qiymatlarda to'lqinmavjud bo'lmasligi aniqlandi.

7. Quduq qoplamalari va muhitning qovushqoqlik xususiyatini hisobga olish (reologik xususiyatlarni ifodalovchi yadro noldan farqli) Gidro to'lqinning energiyasini dissipatsiyasiga 15-20% ta'sir ko'rsatishi, suv to'lqini dissipatsiyasiga 15% cha ta'sir etishi topildi.

8. Olingan sonli natijalar asosida to'lqinintensivligining oshishi va quduq diametrining oshishi bilan kuchlanish quyidagicha o'zgarishi: diametri 1000 mm bo'lgan quduq qoplamalari uchun - 1,10 ... 1,20 marta, diametri 1500 mm dan bo'lgan quduq qoplamasi uchun - 1,20 ... 1,30 marta, diametri 1600 mm bo'lgan quvurlar uchun - 1,50 1,60 marta kuchlanishlarning oshishi aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2021.FM.101.02
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ БУХАРСКОМ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

ТАШКЕНТСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

МИРЗАКАБИЛОВ БЕКЗОД НАРКУЗИЕВИЧ

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ВЯЗКОУПРУГИХ
СКВАЖИНАХ С ЖИДКОСТЬЮ И ДИНАМИЧЕСКОЕ
НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Бухара – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей Аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2024.4.PhD/FM1169.

Диссертация выполнена в Ташкентском химико-технологическом институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Бухарского инженерно-технологического института (www.buxmti.uz) и на Информационно образовательном портале "ZiyoNet" (www.ziyo.net).

Научный руководитель:	Сафаров Исмоил Иброхимович доктор физико-математических наук, профессор.
Официальные оппоненты:	Мавланов Тулкин Мавлонович доктор технических наук, профессор. Хусанов Бахтияр Эргашбаевич доктор физико-математических наук, профессор.
Ведущая организация:	Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека

Защита диссертации состоится 5 апреля 2025 г. в 11⁰⁰ часов на заседании Научного совета Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 при Бухарском инженерно-технологическом институте (Адрес: 100118, г.Бухара, ул. Каюма Муртазаева 15. Тел.: (+998-65) 223-78-84; факс: (+998-65) 223-78-84, e-mail: bmti_info@edu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарского инженерно-технологического института (зарегистрирована за № 458). (Адрес: 100118, г.Бухара, ул.Каюма Муртазаева 15. Тел.: (+99865) 223-78-84;).

Автореферат диссертации разослан 14 марта 2025 года.

(Протокол рассылки № 11 от 13 декабря 2024 г.)



М.Х. Тешаев.

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

З.И. Болтаев

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

М.З. Шарипов

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире при добыче подземных полезных ископаемых - нефти и газа, одно из ведущих мест занимает применение усовершенствованных методов расчета при оценке состояния прочности ближайшей призабойной зоны скважины и покрытий скважин, а также при решении задач повышения их прочности. Учитывая, что в мировом масштабе амплитуда волны, распространяющейся вдоль оси бурения, ослабевает с увеличением глубины, при изучении упругих свойств около скважин необходимо внедрение в практику новых методов исследования и оценки динамики волновой нагрузки, основанных на теории распространения акустических волн. В связи с этим важно обеспечить прочность скважин при добыче полезных ископаемых - нефти и газа, снизить в допустимых пределах динамические напряжения и деформации, возникающие в обкладках скважин, разработать надежные методы расчета, обеспечивающие наименьшее распределение накопления напряжений.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на разработку усовершенствованных эффективных методов исследования прочности материалов, используемых в подземных сооружениях, в том числе цилиндрической оболочки из многослойных композиционных материалов со сложными физическими свойствами и взаимодействием со средой. В связи с этим особое внимание уделяется созданию и развитию эффективных методов расчета усовершенствованных и упрощенных математических моделей определения напряженно-деформированного состояния с учетом вязкоупругих свойств цилиндрических оболочек с жидкостью.

В нашей республике в области строительства и техники осуществляются широкомасштабные мероприятия по разработке методики и алгоритма определения напряженно-деформированного состояния вязкоупругих цилиндрических оболочек с заполнителями, находящихся под воздействием различных динамических нагрузок, а также разработке мероприятий по внедрению их в практику, и достигнуты определенные результаты. В Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 "О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы" определены важные задачи, в том числе "...уделение особого внимания строительству объектов инженерно-коммуникационной и социальной инфраструктуры исходя из "точек роста" регионов¹. При выполнении этих задач, в том числе в промышленно развитых странах, для обеспечения прочности и конкурентоспособности специальных подземных строительных конструкций, разработка усовершенствованных математических моделей, эффективных методов расчета, изучение научных основ проблемы воздействия сейсмических волн на сооружения со специальным композитным покрытием, развитие теории, совершенствование научной базы, а также разработка эффективных методов расчета, проведение целевых научных исследований в этих направлениях, изучение, анализ сейсмодинамических процессов в подземных и наземных сооружениях и решение таких сложных задач численными методами, а также разработка алгоритмов имеет важное значение.

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № ПФ-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы»

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан от 30 мая 2022 года No УП-144 "О мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности Республики Узбекистан," Постановлении Президента Республики Узбекистан от 16 мая 2023 года No ПП-158 "О дополнительных мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан," Постановлении Президента Республики Узбекистан от 17 апреля 2024 года No ПП-161 "О мерах по повышению сейсмостойкости зданий и сооружений, а также совершенствованию деятельности по мониторингу сейсмической опасности," а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данная диссертация выполнена в рамках приоритетного направления IV «Математика, механика и информатика», определённого для развития науки и технологий в Республике Узбекистан.

Обзор международных научных исследований по теме диссертации.

Научно-исследовательские работы по изучению распространения волн и динамического напряжённо-деформированного состояния в жидких скважинах в вязкоупругой среде проводятся во многих научных центрах зарубежных стран. В том числе: США (штат Нью-Йорк; Техасский университет, Остин, Техас; Университет Огайо, Афины; Северо-Восточный университет штата Огайо, Эванстон, Иллинойс; Корнеллский университет, Итака), Иран (Тегеранский университет, Тегеран), Россия (Саратовский государственный университет им. Чернышевского, Томский политехнический университет, Санкт-Петербургский технический университет, Московский институт электронных машин (технический университет), Пермский государственный университет, МГУ, Новосибирское отделение Академии наук и др.), Индия (Технический университет им. Р. Ганди, г. Бхопал; Технологический университет, г. Канпур), Украина (Институт гидромеханики Национальной академии наук Украины (УМФА), Институт механики им. С. П. Тимошенко, Киев), Беларусь (Белорусский государственный университет, Минск), Бразилия (Рио-де-Жанейро, Католический университет), Армения (Институт механики НАН Армении), Англия (Оксфордский университет), Азербайджан (Физико-математические науки Академии национальных наук Азербайджана), Казахстан (Казахско-Турецкий международный университет имени А. Ясави, Туркестан) и так далее. В этих научных центрах большое внимание уделяется изучению деформируемых свойств конструкций.

Степен изученности проблемы. Научно-исследовательские работы по распространению волн и динамическому напряжённо-деформированному состоянию в текучих скважинах в вязкоупругой среде проводились следующими известными зарубежными учёными: Ильюшиным А.А., Бреховских Л.В., Викторовым И.А., Горшковым А.Г., Вольмиром А.С., Генкиным М.Д., Шемякиным Е.И., Гузём А.Н., Гринченко В.Т., Комиссаровой Г.Л., Нигулем Ю.К., Гоголадзе В.Г., Митрой Р., Кольским Г., Уайтом, Ахенбахом Ю.Д., Шафером Б.В., Трояновским И.Е., Кийко И.А., Молотковым Л.А., Новичковым Ю.Я., Петрашенем Г.И., Крауклисом П.В., Слепяном Л.И., Фроловым К.В., Антоновым А.Н., Матвеевко В.П., Шардаковым И.Н., Старовойтовым Е.И.,

Анофриковой Н.С., Микером Т., Мейтцлером А., Дэвисом Р.М., Сунем Р.И. и другими. Решение данных задач также внесли и продолжают вносить свой вклад узбекские учёные: Уразбаев М.Т., Ширинкулов Т.Ш., Рахматулин Х.А., Кабулов В.К., Рашидов Т.Р., Мубораков Я.Н., Мардонов Б.М., Султанов С., Маматкулов Ш.М., Мирсаидов М.М., Бадалов Ф.Б., Хойметов Г.Х., Ишанходжаев А.А., Мавлонов Т.М., Абдусатторов А.А., Сафаров И.И., Худайназаров Х.Х., Хусанов Б.Э., Тешаев М.Х., Бозоров М.Б., Эшматов Х., Юлдашев Ш.С., Абдукадиров С.А., Усаров М.К. и другие. Они разработали методы расчёта параметров, характеризующих динамические свойства подземных цилиндрических и сферических сооружений с учётом реологических свойств материалов. Несмотря на достигнутый прогресс, существует ряд нерешённых проблем. Учитывая диссипативные неоднородные характеристики специальных подземных сооружений, использование методов механики деформируемого твёрдого тела при исследовании динамических процессов позволяет решить многие задачи практического значения в данной области.

Связь темы диссертации с исследовательскими планами высшего учебного заведения, в котором выполнялась диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках фундаментального научного проекта на тему ОТ-Ф4 «Развитие теории и разработка нелинейных динамических методов исследования напряжённо-деформированного состояния криволинейных участков многослойных композитных труб, транспортирующих вязкую жидкость под воздействием температурных и динамических нагрузок», реализованного в 2017–2020 годах согласно плану научно-исследовательских работ Ташкентского химико-технологического института.

Цель исследования заключается в разработке алгоритмов и методик решения задач, а также в построении математической модели для изучения напряжённо-деформированного состояния, вызванного неустойчивым и гармоническим нагружением специальной конструкции в виде вертикальной скважины, расположенной в деформируемой среде.

Задачи исследования

Разработка алгоритма и метода решения, а также математической постановки задачи для поиска состояния динамического напряжения и деформации, возникающего в результате действия продольных или поперечных волн, падающих под углом к оси вертикальной скважины с жидкостью, армированной цилиндрической оболочкой, расположенной в вязкоупругом пространстве.

Разработка алгоритма и методов исследования характеристических колебаний жидкой вертикальной скважины, армированной цилиндрической оболочкой, расположенной в вязкоупругом пространстве.

Разработка алгоритма и метода изучения формирования трубных волн под воздействием сейсмических волн в скважинах.

Проведение сравнительной оценки напряжённо-деформированного состояния и напряжений при нагружении поперечной и продольной волной на глубокую пластовую скважину.

Объект исследования: вертикальная (или жидкостная) скважина.

Предмет исследования. Предметом исследования является разработка методов решения задач вязкоупругой теории с учётом особенностей продольного или поперечного волнового нагружения и дифракции в длинной вертикальной

цилиндрической скважине.

Методы исследования. В ходе исследования были найдены решения с использованием специальных функций механики деформируемого твёрдого тела и математической физики. Для решения задач, связанных с частными производными и интегро-дифференциальными уравнениями механики деформируемого твёрдого тела и теории упругости, применялись методы Гаусса, интегральные преобразования Мюллера и Фурье.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

на основе методов волновой динамики задача распространения собственной волны в укрепленной и неукрепленной скважине с вязкоупругой жидкостью получено дисперсионное уравнение с комплексными параметрами, описывающее соотношения собственной частоты, длины волны, фазовой скорости и групповой скорости, и разработан алгоритм его численного решения;

методика и алгоритм нахождения динамического напряженно-деформированного состояния, возникающего при нагружении гармонических волн на укрепленную и неукрепленную скважину в вязкоупругой среде, разработаны на основе методов теории вязкоупругости;

наличие трубных и жидкостных волн в скважинах с вязкоупругой жидкостью, помимо классических волн, было обнаружено на основе расчета предельных значений комплексной фазовой скорости и частоты;

на основе численных расчетов установлено, что гармонические волны, нагружаемые на скважины с вязкоупругой жидкостью, зависят от угла нагружения, соотношения жесткостей покрытия скважины и среды, длины волны и реологических параметров среды.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Разработаны методы расчёта прочности скважин для оценки напряжённо-деформированного состояния, вызванного сейсмоволновым нагружением многослойных скважин.

Решена задача определения конечного числа мод комплексных частот в сеймоспектральной задаче многослойных труб для жидкости.

Определены распределения напряжений в цилиндрическом пространстве, защищённом цилиндрической оболочкой и деформируемой средой, при сейсмическом продольном и поперечном нагружении многослойных скважин с жидкостью.

Достоверность результатов исследования обоснована сравнением с решениями, полученными другими учёными, использованием методов, основанных на строгих математических соотношениях, а также корректной постановкой краевой и спектральной задач.

Научная значимость результатов исследования заключается во внесении значительного вклада в развитие теории волнового нагружения и дифракции в скважинах и трубопроводах с определёнными параметрами, находящихся в упругой среде.

Практическая значимость исследовательской работы обусловлена возможностью изучения новых закономерностей напряжённо-деформированного состояния в скважинах с заданными параметрами, находящихся в упругой среде, возникающего под воздействием волнового нагружения. Кроме того, практическая значимость подтверждается решением задачи определения конечного числа мод комплексных частот в краевой и спектральной задачах.

Внедрение результатов исследования. Методы расчета динамического напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек, расположенных в упругих и вязкоупругих плоскостях под действием динамических сил, основаны на научных результатах, полученных в научно-исследовательской работе:

из новых оптимальных алгоритмов и программных средств, разработанных для решения задач распространения волн в геофизике, и из методов решения задач учета взаимодействия среды с трубами, работающими под давлением, с цилиндрической оболочкой, было использовано, в фундаментальном проекте ОТ-Atex-2018-340 «Теоретическое и численное исследование практических геофизических вопросов двухскоростной динамики среды» (Справка Каршинским государственным университет № 04/3300 от 10 октября 2024 г.). В результате удалось предварительно оценить резонансные амплитудные областей вибрации труб с вязкоупругой жидкостью;

методы численного решения задач вибрации и дифракции скважин, находящихся в вязкоупругой среде под действием динамических сил были внедрены в рамках фундаментального проекта ОТ-Ф4-01 по теме «Разработка и теоретическая проработка методов исследования нелинейного динамического напряжённо-деформированного состояния под воздействием температуры и динамического нагружения криволинейных участков многослойных композитных труб, транспортирующих вязкую жидкость» Ташкентского химико-технологического института в 2016-2020 гг. (Справка №1/01-2896 Ташкентского химико-технологического института от 13 ноября 2024 г.). В результате появляется возможность учитывать диссипацию энергии, возникающую в системе, при оценке динамического состояния цилиндрических конструкций.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены и одобрены на международных и республиканских конференциях, включая 9 международных и 17 республиканских научно-практических конференций. Основные результаты диссертации представлены и обсуждены на научных семинарах, проведённых в Ташкентском химико-технологическом институте 17 октября 2024 года в городе Ташкент, в Ташкентском институте инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства 2 ноября 2024 года в Ташкенте, в Навоийском государственном горно-технологическом университете 16 ноября 2024 года в городе Навои и в Институте сейсмостойкости сооружений и механики имени М.Т. Урозбоева 18 ноября 2024 года в Ташкенте.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 37 научных работ, включая 10 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций (PhD), из них 8 статей опубликованы в республиканских и 2 в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** диссертации обоснованы актуальность и необходимость

диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, а также объект и предмет. Продемонстрировано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования. Кроме того, обоснована достоверность полученных результатов, освещены их научная и практическая значимость. Приведены сведения о практическом внедрении результатов исследования, апробации работы, опубликованных работах, структуре и объёме диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной **«Анализ литературы, посвященной изучению распространения волн и динамического напряжённо-деформированного состояния в жидких скважинах в вязкоупругой среде»**, представлен краткий анализ литературы, посвящённой исследованию напряжённо-деформированного состояния глубоководных скважин различного сечения под воздействием собственных и гармонических волн. На основе анализа литературы сделаны соответствующие выводы. Глава состоит из трёх параграфов.

В первом параграфе, озаглавленном «Обзор литературы по изучению воздействия волн на полезно-ископаемые скважины», кратко представлен анализ литературы, посвящённой исследованию сейсмостойкости цилиндрических оболочек, трубопроводных конструкций, тоннелей метрополитена, газохранилищ и других подземных сооружений, расположенных в грунтовой среде в сейсмической зоне.

Второй параграф этой главы озаглавлен «Обзор литературы, посвящённой изучению распространения волн в волноводах, состоящих из многослойных вязкоупругих сред». Основной задачей проектирования скважин в сейсмических районах является разработка конструктивных решений, способных выдерживать сейсмические нагрузки, обеспечивать безопасность, экономичность и одновременно быть совместимыми с решениями, применяемыми для борьбы с другими природными и техногенными опасностями.

Третий параграф озаглавлен «Анализ литературы, посвящённой изучению дифракции волн в сосредоточенном однородном жидком цилиндрическом теле, находящемся в деформируемой среде». Проанализирована литература, посвящённая расчёту сейсмических нагрузок в тонкостенных тоннелях. Показана необходимость учёта пространственных условий и совершенствования методов расчёта при проектировании таких конструкций.

Во второй главе диссертации, озаглавленной «Методы постановки и решения задач распространения затухающих волн и волнового нагружения в многослойных скважинах», представлены методы постановки и решения задач распространения затухающих волн и волнового нагружения в многослойных скважинах. Рассмотрена задача определения и анализа напряжённо-деформированного состояния армированной скважины в вязкоупругой среде под воздействием сейсмических волн.

Для тонких цилиндрических оболочек, перекрывающих скважину, целесообразно применять гипотезу Кирхгофа-Лява или гипотезу С. П. Тимошенко. В работе использованы дифференциальные уравнения движения оболочки, а также уравнения вязкоупругой теории механики деформируемых тел для толстых цилиндров. В результате уравнения движения механической системы, состоящей

из многослойных оболочек (или толстостенных цилиндров), будут иметь следующий вид:

$$(\tilde{\lambda}_j + 2\tilde{\mu}_j) \text{grad div } \vec{u}_j - \tilde{\mu} \text{rot rot } \vec{u}_j + \vec{b}_j = \rho_j \frac{\partial^2 \vec{u}_j}{\partial t^2}, (j=1,2,..N). \quad (1)$$

Если механическая система состоит из цилиндрических оболочек, то его дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$L\tilde{E}\vec{u} = \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0 h_0} \vec{p} + \rho_0 \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0} \left(\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \right), (k=1,3...N-1) \quad (2)$$

$$\Delta \varphi_0 - \frac{1}{c_\infty^2} \ddot{\varphi}_0 = 0. \quad (3)$$

Если цилиндрический слой заполнен вязкой жидкостью, то используется уравнение Навье – Стокса

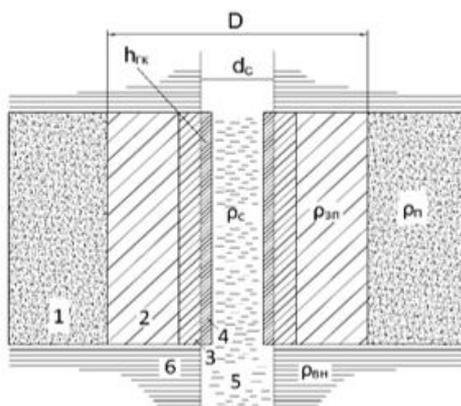


Рисунок -1. Схема расчета волнового нагружения многослойной жидкостной скважины, расположенной в деформируемой среде

Если цилиндрическое сооружение состоит из слоев, то уравнения его движения будут иметь вид (2). Контактные и граничные условия задаются следующим образом:

1. Если цилиндрическое тело состоит из слоев, то уравнения его движения будут иметь вид (1). Между слоями накладывается условие жесткости или проскальзывания

$$r = a_k: \quad \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)}; \quad \sigma_{rz k} = \sigma_{rz(k+1)}; \\ u_k = u_{k+1}; \quad \vartheta_k = \vartheta_{k+1}; \quad w_k = w_{k+1}. \quad (4)$$

2. Вставляется условие скольжения между слоями (при отсутствии сопротивления между слоями)

$$r = a_k: \quad \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{rz k} = 0; \\ \sigma_{r\theta(k+1)} = \sigma_{rz(k+1)} = 0; \quad w_k = w_{k+1}. \quad (5)$$

3. Если $r = a_1$ первый слой без жидкости и наполнителя, то вставляется условия отсутствия напряжений

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

4. Если между слоями поместит безмассовый элемент, то граничное (контактное) условие для случая плоской деформации будет следующим:

$$\begin{aligned}
r = a_\kappa : \quad \sigma_{r\kappa} &= \sigma_{r(\kappa+1)}; \quad \sigma_{r\theta\kappa} = \sigma_{r\theta(\kappa+1)}; \\
\sigma_{r\kappa} &= \bar{k}_r (u_{r\kappa} - u_{r(\kappa+1)}); \\
\sigma_{r\theta\kappa} &= \bar{k}_\theta (u_{\theta\kappa} - u_{\theta(\kappa+1)}).
\end{aligned} \tag{7}$$

Если радиальная координата от структуры стремится к бесконечности, то продольный и поперечный волновые потенциалы удовлетворяют условию поглощения Зоммерфельда

$$\begin{aligned}
\lim_{r \rightarrow \infty} r\varphi &= \text{const}, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} - ik\varphi \right) = 0 \\
\lim_{r \rightarrow \infty} r\psi &= \text{const}, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} - ik_2\psi \right) = 0.
\end{aligned} \tag{8}$$

Цилиндрические волны, распространяющиеся в среде, для случая плоской деформации имеют следующий вид:

$$\phi_N^{(p)} = \phi_0 i\pi \sum_{n=1}^{\infty} [(-1)^n E_n J_n(\alpha_N r) H_n^{(1)}(\alpha_N z)] \cos n\theta e^{-i\omega t}, \tag{8.1}$$

Выразим через продольный и поперечный волновые потенциалы вектора перемещения дифференциальную уравнению в частных производных с окружающей средой и наполнителем цилиндрической оболочки

$$\vec{u}_j = \text{grad}\phi_j + \text{rot}\vec{\psi}_j, \text{div}\vec{\psi}_j = 0, \tag{9}$$

Основные вопросы приводятся к задачам случай плоской деформации теории упругости. Следовательно, $\vec{\psi}_j(\psi_{zj}, 0, 0)$ продольные и поперечные волновые потенциалы удовлетворяют следующим интегродифференциальным уравнениям

$$\begin{aligned}
\Gamma_{\lambda\mu\kappa} \nabla^2 \phi_k - \frac{1}{c_{p0k}^2} \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial t^2} &= 0; \quad \Gamma_{\mu\kappa} \nabla^2 \psi_z - \frac{1}{c_{s0k}^2} \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial t^2} = 0; \\
\phi_j &= \sum_{n=0}^{\infty} [A_{nj} H_n^{(1)}(\alpha_j r) + A'_{nj} H_n^{(2)}(\alpha_j r)] \cos n\theta e^{-i\omega t}; \\
\psi_j &= \sum_{n=0}^{\infty} [B_{nj} H_n^{(1)}(\beta_j r) + B'_{nj} H_n^{(2)}(\beta_j r)] \sin n\theta e^{-i\omega t}; \quad j=1, 2, \dots, N-1 \\
\phi_N &= \sum_{n=0}^{\infty} [C_{nN} H_n^{(1)}(\alpha_N r) + D_{nN} H_n^{(2)}(\alpha_N r)] \cos n\theta e^{-i\omega t}, \\
\psi_N &= \sum_{n=0}^{\infty} [M_{nN} H_n^{(1)}(\beta_N r) + L_{nN} H_n^{(2)}(\beta_N r)] \sin n\theta e^{-i\omega t}, \\
\phi_0 &= \sum_{n=0}^{\infty} [K_{n0} J_n(\alpha_0 r) + K'_{n0} N_n(\alpha_0 r)] \cos n\theta e^{-i\omega t},
\end{aligned} \tag{11}$$

Где n - целое число; ω - при изучении свободных колебаний комплексная частота, при изучении вынужденных колебаний принимается за действительную величину.

где $A_{nj}, A'_{nj}, B_{nj}, B'_{nj}, C_{nj}, D_{nj}, L_{nN}, M_{nN}, K_{nN}$ и K'_{nN} - произвольные инвариантные величины, находящиеся из граничных условий; $H_n^{(1)}(\alpha_j r)$ и

$H_n^{(2)}(\alpha_j r)$ – функции Бесселя и Ханкеля соответственно $H_n^{(1),(2)}(\alpha r) = J_n(\alpha r) \pm iN_n(\alpha r)$. Если в среде распространяется плоская волна, то амплитуда напряжения будет следующей. Для нахождения произвольных констант используем граничные условия (4) – (7), то получим систему алгебраических уравнений с неоднородными комплексными коэффициентами

$$\left[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j) \right] \{q\} = \{P\}, \quad (12)$$

где $\{q\}$ - это вектор состоит из произвольных постоянных; $\{P\}$ -вектор при воздействии внешних волн; $[C_1]$ -квадратная матрица, состоящий из функции Бессел и Ханкеля. Для расчета $\sigma_{\theta\theta}$ контурного напряжения

$$\sigma_{\theta\theta}|_{r=0} = (\text{Re} + iJ_m) e^{-i\omega t} = \sqrt{\text{Re}^2 + J_m^2} e^{-i(\omega t - \gamma)}, \quad \gamma = \arctg \frac{J_m}{\text{Re}} \quad (13)$$

Таким образом, во второй главе, при решении задач гармонического волнового нагружения (и дифракции) с использованием уравнения Ламе, выраженного через перемещения, была получена система специальных производных интегро-дифференциальных уравнений, записанных через потенциалы смещений. Разработаны алгоритм и методика расчёта, позволяющие получить аналитическое решение на основе методов Гаусса, Лапласа и специальных функций.

Третья глава диссертации, озаглавленная «Удельные колебания и распространение волн многослойных цилиндрических скважин в вязкоупругой среде», посвящена изучению характеристических колебаний и распространения волн в цилиндрических скважинах, расположенных в вязкоупругой (жидкой) среде. $r=1 \quad \sigma_{rr} = 0 \quad \sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0$

В качестве первой задачи рассмотрим проблему характеристических колебаний цилиндрической полости, находящейся в вязкоупругой среде. На границе полости накладывается условие равенства напряжений нулю. Используя контактные и граничные условия, можно получить систему однородных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами.

Для того чтобы эта система однородных уравнений имела решение, её главный определитель, составленный из коэффициентов перед неизвестными, должен быть равен нулю. Элементы главного определителя являются функциями комплексного параметра. Рассмотрим цилиндрическую полость радиусом $r=1$. Предполагается, что нормальное ($\sigma_{rr} = 0$) и касательное ($\sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0$) напряжения на поверхности полости равны нулю. Используя это условие, можно вывести дисперсионное уравнение:

$$\|c_{ij}\| = 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (14)$$

Где

$$\begin{aligned} c_{11} &= (n^2 - 1 - \Omega^2 + \gamma_p^2) H_n^{(1)}(\alpha), \\ c_{12} &= (n^2 - 1 - \beta^2) H_n^{(1)}(\beta), \\ c_{13} &= 2(n^2 - 1) [\beta H_{n-1}^{(1)}(\beta) - n H_n^{(1)}(\beta)] - \beta^2 H_n^{(1)}(\beta), \\ c_{21} &= \alpha H_{n-1}^{(1)}(\alpha) - (n+1) H_n^{(1)}(\alpha), \end{aligned}$$

$$c_{22} = \beta H_{n-1}^{(1)}(\beta) - (n+1)H_n^{(1)}(\beta),$$

$$c_{23} = (2n^2 + n - \gamma_p^2)H_n^{(1)}(\beta) - 2\beta H_{n-1}^{(1)}(\beta),$$

$$c_{31} = \alpha H_{n-1}^{(1)}(\alpha) - nH_n^{(1)}(\alpha),$$

$$c_{32} = (1 - \Omega^2 / 2\gamma_p^2)(H_{n-1}^{(1)}(\beta) - nH_n^{(1)}(\beta)),$$

$$c_{33} = n^2 H_n^{(1)}(\beta).$$

Это уравнение (14) выражает связь между безразмерной частотой Ω , постоянной распространения волны γ_p и коэффициентом Пуассона при каждом значении $n = 1, 2, 3, \dots$. Дисперсионное уравнение (14), заданное в определителе, является функцией Ханкеля n -го порядка. Специальные функции, такие как функция Ханкеля, представляют собой сложные функции с комплексными аргументами.

Таблица -1.

Изменение действительной части комплексная частота зависимо от h/R .

h/R	Собственные числа (действительная част комплексной частоты)				
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
1	0,07906	0,65168	1,50937	3,46217	5,43208
2	0,07472	0,43827	1,32169	2,86027	4,01843
3	0,06763	0,32809	0,97891	2,37612	4,21305
4	0,07672	0,23245	0,78271	1,58961	3,58168
5	0,12445	0,292026	0,53272	1,47858	3,30664

Уравнение частоты с комплексным параметром (14) решается методом Мюллера. Корни этого трансцендентного уравнения (14) состоят из двух частей. Действительная ($\text{Re}\Omega$) и абстрактная ($\text{Im}\Omega$) части действительной части комплексной частоты представляет собой частоту колебаний механической системы, а абстрактная част представляет собой коэффициент демпфирования (коэффициент демпфирования). Результаты расчета $n \geq 0$, ($\nu_1 = 0,25$) представлены в таблице -1. Из анализа результатов таблицы с увеличением n также увеличиваются действительная и абстрактная части комплексной частоты.

Таблица-2.

Сравнение результатов ($\nu = 0,25$)

№ n	Результаты диссертации	Рао и Мао	Внрон и Парнец
0	0,44741-0,44420 i	0,44647-0,44127 i	0,4464-0,4410 i
1	1,09272-0,77653 i	1,09272-0,7653 i	1,0929-0,441 i
2	1,907554-0,89782 i	1,90754-0,8978 i	1,9076-0,897 i
3	2,75652-0,99151	2,75652-0,9915 i	
4	3,63132-1,06662 i	3,63132-1,0666 i	
5	4,52440-1,13140 i	4,52440-1,1314 i	

Поскольку частотное уравнение (14) зависит только от коэффициента Пуассона (ν). Реальная и абстрактная части частоты изменяются до 27% при изменении значения коэффициента Пуассона в диапазоне $0 \leq \nu \leq 0,4$. В ходе расчета вычислялас 5-6 член функции Бесселя и Ханкеля. Расчет прекращался,

когда точност составляла $10^{-8} - 10^{-6}$. Трех параметрическое ядро Ржаницына-Колтунова получено как ядро релаксации

$$A = 0,048; \beta = 0,05; \alpha = 0,1 \quad R(t) = \frac{Ae^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}, \quad (15)$$

где A, α, β - параметры ядра. Сравнение результатов ($\nu = 0,25$) представлено в таблице-2. Если перемещение (к) многослойных цилиндрических оболочек, находящихся в среде, представлено функциями комплексного аргумента Бесселя и Неймана n-го порядка

$$u_{rk} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \gamma_k \left[A_{1kn} J'_n(\gamma_{1k} r) + A_{2kn} Y'_n(\gamma_{1k} r) \right] + \frac{n}{r} \left[A_{3kn} J_n(\gamma_{2k} r) + A_{4kn} Y_n(\gamma_{2k} r) \right] - \right. \\ \left. - \frac{r\gamma_{2k}}{\mu_{2k}} \left[A_{5kn} J'_n(\gamma_{2k} r) + A_{6kn} Y'_n(\gamma_{2k} r) \right] \right\} \cos n\phi e^{i(-\omega t + \gamma_p z)} \quad (16)$$

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

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

где

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

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

Мы используем граничные условия для нахождения произвольных констант. Тогда мы получаем систему однородных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами для нахождения произвольных констант.

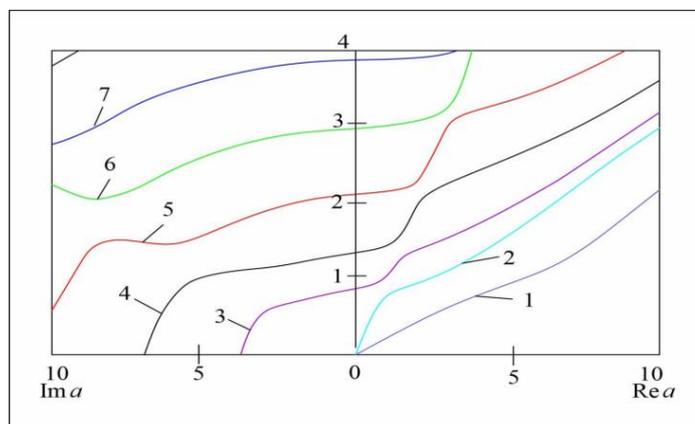


Рисунок-2. Изменение частоты в зависимости от комплексного волнового числа (n=0)

$$v_1 = 0,2; v_0 = 0,25; \rho^* = \frac{\rho_1}{\rho_0} = 1,10; \mu = \frac{\mu_1}{\mu_2} = 0,31; \gamma = \frac{c_{p1}}{c_{p2}} = 0,7$$

Чтобы эта система имела решение, ее основной определитель должен быть равен нулю.

$$\Delta(C, \omega, \gamma_p, \lambda) = 0. \quad (17)$$

Пространственные $C = C_R + iC_I$ и групповые скорости $V = V_R + iV_I$ находятся на основе метода Мюллера для нахождения изменения волнового числа γ_p . Численные результаты были получены для следующего случая, если цилиндрический слой находится в бесконечной среде.

На рисунках 2 и 3 численных результатов показано изменение частоты в зависимости от количества сложных волн для $n=0$ и $n=1$. Видно, что изменение частот в зависимости от действительной и абстрактной части волнового числа оказывается монотонным.

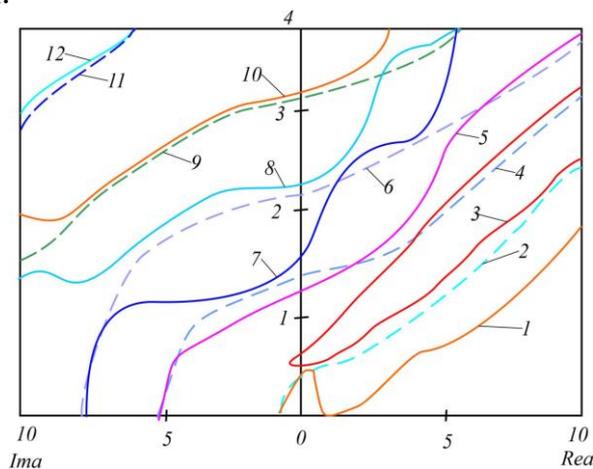


Рисунок-3. Изменение частоты в зависимости от комплексного волнового числа ($n=1$)

$$v_1 = 0,2; v_0 = 0,25; \rho^* = \frac{\rho_1}{\rho_0} = 1,10; \mu = \frac{\mu_1}{\mu_2} = 0,31; \gamma = \frac{c_{p1}}{c_{p2}} = 0,7.$$

Предположим, что скважина ($r \leq a, -\infty < z < \infty$), расположенная в среде $r > a$ с бесконечной упругостью, заполнена жидкостью (a - радиус скважины, z - продольная ось скважины). Введем следующие значения. c_{p2} и c_{s2} скорости продольных и поперечных волн, распространяющихся в скважину, соответственно, c_{p3} и c_{s3} скорости продольных и поперечных волн, распространяющихся в среду, окружающую скважину, соответственно, c_1 - скорость звуковой волны, ρ_1 - плотность жидкости. Как и в предыдущих главах, в этой главе уравнение движения решается с помощью потенциалов смещения. Это продольный φ_2 и поперечный ψ_2 для ствола скважины, а для среды φ_3 - ψ_3 потенциалы и φ_1 - продольный волновой потенциал для жидкости. В этом случае дифференциальные уравнения движения такие же, как и в потенциалах смещения

$$\frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_j}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial z^2} - \int_0^t R_{pj}(t-\tau) \nabla^2 \varphi_j(r, \tau) d\tau = \frac{1}{c_{pj}^2} \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial t^2} \quad (j=1,2,3),$$

$$\frac{\partial^2 \psi_k}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi_k}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial z^2} - \int_0^t R_{sk}(t-\tau) \nabla^2 \psi_k(r, \tau) d\tau = \frac{1}{c_{sj}^2} \frac{\partial^2 \psi_k}{\partial t^2} \quad (k=2,3), \quad (18)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Где $R_{pj}(t-\tau), R_{sj}(t-\tau)$ – ядерная релаксация. Смещения и напряжения на границе контакта окружающей среды и скважины предполагаются одинаковыми или прерывистыми.

$$u_{r2} \Big|_{r=r_2} = u_{r3} \Big|_{r=r_2}, u_{z2} \Big|_{r=r_2} = u_{z3} \Big|_{r=r_2}, \tau_{rz2} \Big|_{r=r_2} = \tau_{rz3} \Big|_{r=r_2}, \sigma_{rr2} \Big|_{r=r_2} = \sigma_{rr3} \Big|_{r=r_2},$$

$$u_{r1} \Big|_{r=r_1} = \frac{\partial u_{r2}}{\partial t} \Big|_{r=r_1}, u_{z1} \Big|_{r=r_2} = \frac{\partial u_{z2}}{\partial t} \Big|_{r=r_2}, \tau_{rz1} \Big|_{r=r_1} = 0. \quad (19)$$

Для упрощения представленного выше интегро-дифференциального уравнения воспользуемся методом «замораживания». Тогда мы можем преобразовать соотношение (18) к следующему виду

$$\bar{\lambda}_\kappa f(t) = \lambda_{0\kappa} \left[1 - \Gamma_{\lambda\kappa}^C(\omega_R) - i\Gamma_{\lambda\kappa}^S(\omega_R) \right] f(t),$$

$$\bar{\mu}_\kappa f(t) = \mu_{0\kappa} \left[1 - \Gamma_{\mu\kappa}^C(\omega_R) - i\Gamma_{\mu\kappa}^S(\omega_R) \right] f(t), \quad (20)$$

$$\Gamma_{\lambda\kappa}^C(\omega_R) = \int_0^\infty R_{\lambda\kappa}(\tau) \cos \omega_R \tau d\tau, \Gamma_{\mu\kappa}^C(\omega_R) = \int_0^\infty R_{\mu\kappa}(\tau) \cos \omega_R \tau d\tau,$$

$$\Gamma_{\lambda\kappa}^S(\omega_R) = \int_0^\infty R_{\lambda\kappa}(\tau) \sin \omega_R \tau d\tau, \Gamma_{\mu\kappa}^S(\omega_R) = \int_0^\infty R_{\mu\kappa}(\tau) \sin \omega_R \tau d\tau,$$

являются соответственно, косинусным и синусоидальным представлением релаксации ядра Фуре, ω_R - действительная величина. Если принят во внимание, что решение уравнения в частных производных с комплексными коэффициентами $r=0$ ограничено и обращается в нуль на бесконечности, его можно записать как $r=a$

$$\varphi_1 = A \cos kz I_0(k_\alpha r \alpha_1) \exp(ik_\alpha c_\phi t),$$

$$\varphi_2 = [BI_0(k_\alpha r \alpha_2) + CK_0(k_\alpha r \alpha_2)] \cos kz \exp(ik_\alpha c_\phi t),$$

$$\psi_2 = [DI_1(k_\alpha r \beta_2) + EK_1(k_\alpha r \beta_2)] \sin kz \exp(ik_\alpha c_\phi t), \quad (21)$$

$$\varphi_3 = [LK_0(k_\alpha r \alpha_3)] \cos kz \exp(ik_\alpha c_\phi t),$$

$$\psi_3 = [MK_1(k_\alpha r \beta_3)] \sin kz \exp(ik_\alpha c_\phi t),$$

где I_0, I_1, K_0, K_1 – модифицированная функция Бесселя; c_ϕ - фазовая скорость; $k_\alpha = 2\pi\omega / c_\phi$ – волновое число; $\omega = \omega_R + i\omega_I$ – комплексная частота

$$\alpha_j = \sqrt{1 - \gamma_j^2 m^2}, \gamma_j = c_{s1} / c_{pj}, \beta_j = \sqrt{1 - \delta_j^2 m^2},$$

$$\delta_j = c_{s1} / c_{sj}, m = c_\phi / c_{s1}.$$

Если решению (21) поставит на краевое условие (19), то получим систему $\Delta\{X\} = 0$, состоящую из 7 алгебраических уравнений с 7 неизвестными для нахождения произвольных констант A, B, C, D, E, L, M. Чтобы эта система имела ненулевое, то есть нетривиальное решение, основной определитель должен быть равен нулю.

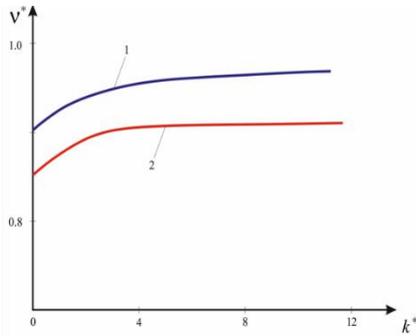


Рис.- 4. Изменение фазовой скорости в зависимости от волнового числа

$$c_{p1} = 1500m / c^2, c_{p2} = 4500m / c^2, \rho = \rho_1 / \rho_2 = 0.45, \gamma = 0.45(1), \gamma = 0.35(2)$$

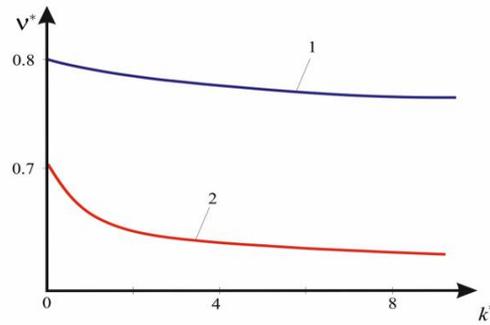


Рис.- 5. Изменение фазовой скорости в зависимости от волнового числа

$$c_{p1} = 1500m / c^2, c_{p2} = 4500m / c^2, \rho = \rho_1 / \rho_2 = 0.35,$$

$$\gamma = c_{s2} / c_{p2}, \gamma = 0.70(1), \gamma = 0.60(2)$$

Численные результаты представлены на рисунках 4 и 5. Видно, что по мере увеличения или уменьшения фазовой скорости она стремится к асимптотике. Характер изменения действительных частей фазовых скоростей различен. Изменение абстрактной части фазовых скоростей также напоминает характер реальной части. Но его значение отличается примерно на 10^{-2} цифры. Метод и алгоритм решения задачи о характеристиках распространения и затухания гармонических волн в скважине с жидкостной полостью - скважине с упругой стенкой в комплексной области не поставлены и не решены.

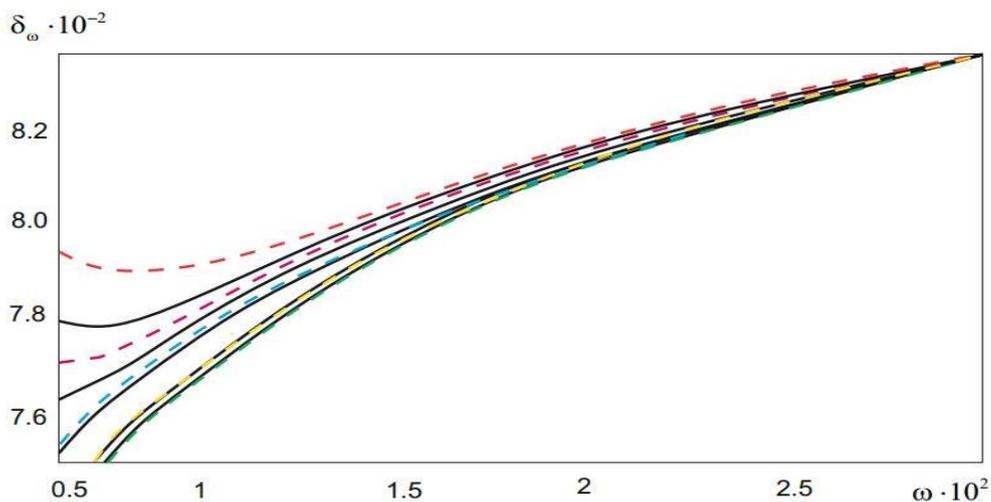


Рисунок-6. Изменение зависимости от частоты затухающего декремента

На рисунке 3.12 приведена зависимость от частоты при $n=1,2,3,4,5,6,7$ первой моды коэффициента затухающей скорости. Видно, что соответствующий коэффициент затухания увеличивается с увеличением частоты. Так, в третьей главе были проанализированы численные результаты на основе решения методики и алгоритма спектральной задачи укрепленных и неукрепленных скважин.

В четвертой главе диссертации под названием «Воздействие и дифракция гармонической волны в жидкой скважине, расположенной в вязкоупругой среде» поставлена задача о плоской и неплоской (антиплоской) скважине и решена аналитическим методом воздействия и дифракции гармонической (Р и ЦV) волны в цилиндрической скважине, расположенной в вязкоупругой среде (жидкостью).

Уравнение колебания среды и армированного колодца представлено во второй главе. На рис.-7 показана эпюра напряжений, возникающая в результате радиального давления в цилиндрической оболочке с жидкостью и без нее.

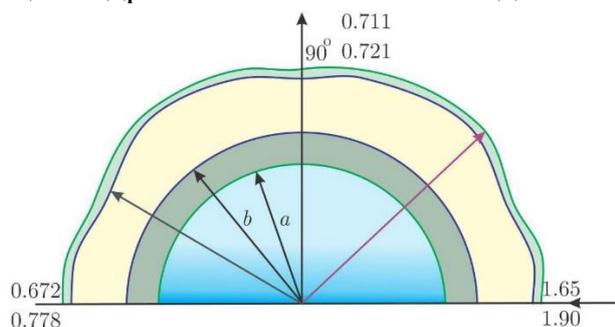


Рисунок-7. График радиальных напряжений в многоконсолидированном участке скважины с жидкостью и без нее

На рисунке-7 показан профиль радиальных напряжений в поперечном сечении многоармированной скважины с жидкостью и без жидкости для железобетонной оболочки для внешней поверхности цилиндра. Было обнаружено, что напряжения в зоне падения в 2,4 раза выше, чем в тылу. Было обнаружено, что жидкост увеличивает радиальное давление на 15%. Из полученных результатов следует, что жидкост в скважине вызывает снижение сейсмостойкости.

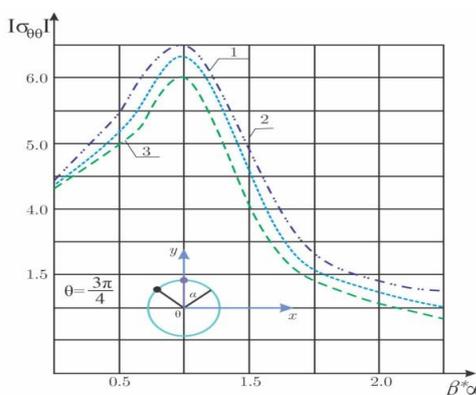


Рисунок-8. Изменение контурного напряжения гидроармированной скважины в зависимости от волнового числа: 1 – упругая среда ($A=0$). 2- $A=0,01$; $\beta=0,05$; $\nu=0,25$; $\alpha=0,1$ 3- $A=0,05$; $\beta=0,01$; $\nu=0,25$; $\alpha=0,1$

Изменение напряжения контура армированной скважины в зависимости от волнового числа представлено на рисунке 8 для различных амплитуд вязкости. Из

рисунка видно, что увеличение вязкости приводит к снижению прочности на 15–20%. Судя по полученным численным результатам, с ростом интенсивности волны и увеличением диаметра скважины напряжение изменяется следующим образом: для покрытия труб с диаметром 1000 мм - в 1,10...1,20 раза, для покрытия труб с диаметром 1500 мм - в 1,20...1,30 раза, для труб диаметром 1600 мм - в 1,50. Обнаружено увеличение напряжения в 1,60 раза.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны программа, алгоритм и методы решения задач, связанных с изучением затухания и предельных состояний, а также распространения собственных волн, характерных для жидкой скважины, расположенной в вязкоупругой среде.

2. Установлено, что первая мода фазовой скорости жидкой вязкоупругой цилиндрической скважины совпадает с фазовой скоростью жидкой упругой цилиндрической скважины с разницей 4–5%. Показано, что изменение абстрактной части фазовой скорости зависит от параметров и происходит монотонно (увеличивается или убывает).

3. Проанализирован процесс поглощения волн в скважине, а также определено, что фазовая скорость или частота являются комплексными величинами. Найдено, что дисперсионное уравнение имеет комплексные корни в левой полуплоскости, а на оси расположены только абстрактные корни. Установлено, что расположение действительной и абстрактной части корней зависит от волнового числа.

4. Найдено, что дисперсионные уравнения для собственных (нормальных) волн соответствуют затухающим колебаниям. Установлено, что действительная часть корней представляет собой частоту или фазовую скорость колебаний, а абстрактная часть — декремент или коэффициент затухания.

5. Обнаружено, что при предельном значении частоты (когда она стремится к нулю) существует волна. Установлено, что при стремлении частоты к бесконечности формируется водная волна. Определено, что фазовые скорости этих волн для скважины в вязкоупругой среде являются комплексными величинами.

6. Установлено, что частота характеризуется явлением отсечки в высокоактивных веществах, однако у каждого из них имеется предел. Обнаружено, что за пределами этого значения или при малых значениях волна не существует.

7. С учётом вязкостных свойств покрытия труб и среды (ненулевое ядро, отражающее реологические свойства), установлено, что влияние на диссипацию энергии гидроволны составляет 15–20%, а на диссипацию водной волны — 15%.

8. На основе численных результатов определено, что с ростом интенсивности волны и увеличением диаметра скважины напряжение изменяется следующим образом:

- для труб с диаметром 1000 мм — увеличение в 1,10–1,20 раза;
- для труб с диаметром 1500 мм — увеличение в 1,20–1,30 раза;
- для труб с диаметром 1600 мм — увеличение в 1,50–1,60 раза.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2021.FM.101.02
ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT BUKHARA
ENGINEERING-TECHNOLOGICAL INSTITUTE**

TASHKENT INSTITUTE OF CHEMICAL TECHNOLOGY

MIRZAKABILOV BEKZOD NARKUZIYEVICH

**WAVE PROPAGATION IN VISCOELASTIC FLUID WELLS AND
DYNAMIC STRESS-STRAIN STATE**

01.02.04 – Mechanics of a deformable solid

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Bukhara – 2025

The theme of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences was registered under No. B2024.4.PhD/FM1169 by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan.

The dissertation has been accomplished at Tashkent Institute of Chemical Technology

The dissertation abstract in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been placed on the website of Bukhara Engineering-Technological Institute (www.buxmti.uz) and on the Information-Educational portal "ZiyoNET" (www.ziynet.uz).

Scientific advisor:	Safarov Ismoil Ibrokhimovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Professor
Official Opponents:	Mavlanov Tulkin Mavlonovich Doctor of Sciences in Technology, Professor Khusanov Bakhtiyar Ergashbayevich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Lead organization:	The National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek

The dissertation defense will be held on 5th April 2025 y. at 11⁰⁰ o'clock at the meeting of Scientific Council Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 at Bukhara Engineering-Technological Institute. (Address: 100118, 15. Qayum Murtazaev street, Bukhara. Phone: (+99865) 223-78-84; fax: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz).

The dissertation is available at the Information resource center of Bukhara Engineering-Technological Institute (registered under the number No.458.). (Address: 100118, 15. Qayum Murtazaev street, Bukhara. Phone: (+99865) 223-78-84).

The disseretation abstract is distributed on 14th March 2025.

(Mailing report № 11 on 13th December 2024)



M.Kh. Teshaeв.

Chairman of the Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc)

Z.I. Boltaev

Scientific Secretary of the Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc), Professor

M.Z. Sharipov

Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc), Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The relevance and relevance of the topic of the dissertation: At present, in the era of rapidly developing technology and engineering in the world, it is necessary to develop improved methods for calculating special underground structures. The main goal of designing underground protective structures in seismic areas is to ensure their withstanding seismic loads, high strength and cost-effectiveness. In earthquake-prone regions, the wave generation causes damage to underground protective structures and wells caused by earthquakes and strong explosions.

The object of study A comparative assessment for the stress-strain state and stress under transverse and longitudinal wave loading on a deep reservoir well as.

The scientific novelty of the study is as follows:

an algorithm and a solution method have been developed, and the problem of finding the state of dynamic stress-strain arising as a result of the action of longitudinal or transverse waves falling at an angle to the axis of a vertical well with liquid reinforced by a cylindrical shell located in a viscoelastic space has been mathematically posed;

an algorithm and methods for studying the natural oscillations of a liquid vertical well reinforced with a cylindrical shell located in a viscoelastic space have been developed;

an algorithm and method for studying the occurrence of tubular and hydraulic waves in liquid wells reinforced with a cylindrical shell located in a viscoelastic space have been developed;

a comparative assessment is given depending on the angle of incidence of the stress-strain state waves and stresses under loading of transverse and longitudinal waves in a deep reservoir well.

Implementation of research results.

The fundamental project OT-Atex-2018-340-"Theoretical and numerical studies of practical geophysical problems in a two-speed dynamic environment" carried out in 2018-2020 by Karshi State University was used to solve problems of taking into account the interaction of the environment with cylindrical pressure pipes (No. 04/3300, dated October 10, 2024). The scientific results obtained in the research work were methods for calculating the dynamic stress-strain state of cylindrical shells located in elastic and viscoelastic planes under the action of dynamic forces.

As a result, thanks to the application of scientific results obtained in the dissertation work, it was possible to estimate the resonant amplitude fields of oscillation of elastic and viscoelastic liquid pipes.

In 2016-2020, the Tashkent Chemical-Technological Institute carried out fundamental project OT-F4-01 "Development and theoretical development of methods for studying the nonlinear dynamic stress-strain state under the influence of temperature and dynamic loading of curved sections of multilayer composite pipes flowing with a viscous liquid" (No. 1 / 01-2896 dated November 13, 2024) in the numerical solution of problems of oscillation and diffraction of liquid wells located in a viscoelastic medium under the action of dynamic forces, as well as in calculating the dynamic state of cylindrical structures, results of accounting for the dissipation of energy generated in the system.

Publication of research results. A total of 37 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, including 10 articles in scientific journals recommended for publication on the main scientific results of dissertations of Doctor of Philosophy (PhD) of the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, including 8 in national and 2 foreign scientific journals .

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 120 pages.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Сагдиев Х.С., Тешабоев З.Р., Галиаскаров В.А., Шерниёзов Х.О., Мирзакабиллов Б.Н. Инструментально-расчетная оценка сейсмостойкости здания на сейсмоизолирующих опорах. *Узбекский журнал «Проблемы механики»*. – 2017. – №2-3. – С. 170-173 (01.00.00, №4).

2. Сагдиев Х.С., Тешабаев З.Р., Галиаскаров В.А., Шерниёзов Х.О., Мирзакабиллов Б.Н., Нишонов Н.А. Модельные исследования взаимодействия полимерных труб с грунтом при действии температуры. ISSN 2010-7250 - *Журнал «Проблемы механики»*. –Ташкент. – 2018. – №2. – С.11-16 (01.00.00, №4).

3. Сагдиев Х.С., Тешабаев З.Р., Ювмитов А.С., Галиаскаров В.А., Шерниёзов Х.О., Мирзакабиллов Б.Н. Оценка соответствия школьных зданий нормам сейсмостойкого строительства. ISSN 2010-7250. *Журнал «Проблемы механики»*. – Ташкент. – 2019. –№1. – С. 53-58 (01.00.00, №4).

4. Сагдиев Х.С., Тешабаев З.Р., Галиаскаров В.А., Ювмитов А.С., Шерниёзов Х.О., Мирзакабиллов Б.Н. Расчет зданий общеобразовательных школ на сейсмические воздействия и рекомендации по обеспечению их безопасной эксплуатации. *Журнал «Проблемы механики»*. –Ташкент. – 2020. – №1-2. –С. 29-34 (01.00.00, №4).

5. Сагдиев Х.С., Ювмитов А.С., Тешабаев З.Р., Галиаскаров В.А., Шерниёзов Х.О., Мирзакабиллов Б.Н., Собиров З.Ж. Оценка сейсмической безопасности зданий дошкольных образовательных учреждений города ташкента и рекомендации по их дальнейшей эксплуатации. *Журнал «Проблемы механики»*. – Ташкент– 2021. – №2. – С. 39-53 (01.00.00, №4)

6. Сагдиев Х.С., Тешабоев З.Р., Галиаскаров В.А., Ювмитов А.С., Шерниёзов Х.О., Мирзакабиллов Б.Н. Экспериментальные исследования подземных полимерных труб при температурных воздействиях на центробежной установке. *Журнал «Проблемы механики»*. –Ташкент. – 2022. – №2. – С. 65-74 (01.00.00, №4).

7. Сагдиев Х.С., Тешабоев З.Р., Галиаскаров В.А., Шерниёзов Х.О., Мирзакабиллов Б.Н. Экспериментальные исследования подземных полиэтиленовых труб при действии динамических (типа сейсмических) нагрузок с применением метода центробежного моделирования. *Журнал «Проблемы механики»*. – Ташкент. – 2022. – №3. – С. 65-71 (01.00.00, №4).

8. Narkuzi Mirzakabilov., Bekhzod Mirzakabilov. “Forced Vibrations of a Viscoelastic Three-Layer Plate”. *AIP Conference Proceedings* 2637, 030017 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0119116>.

9. Сагдиев Х.С., Ювмитов А.С., Галиаскаров В.А., Тешабаев З.Р., Собиров З.Ж., Шерниёзов Х.О., Мирзакабиллов Б.Н. Оценка сейсмостойкости зданий, построенных до применения требований норм сейсмостойкого строительства. *Журнал «Проблемы механики»*. – Ташкент. – 2023. – №1. –С. 100-118 (01.00.00, №4)

10. Kulmurotov N.R., Mirzakabilov B.N. “Diffraction of a harmonic wave by

II bo‘lim (II часть; part II)

11. Mirzakabilov B.N., Mirzakabilov N.X. “Maple dasturida programma ishlab chiqish”. GUVOHNOMA №BGU00899. 2023.13.01.

12. Mirzakabilov B.N., Safarov I.I. “Qovushqoq-elastik muhitdagi suyuqlikli quduqlarda to‘lqintarqalishi va dinamik kuchlanish-deformatsiya holati”. Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi GUVOHNOMA № DGU 43481 O‘zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reyestrída 03.11.2024 y. ro‘yxatdan o‘tkazildi.

13. Тешаев М.Х., Сафаров У.И., Мирзакабиллов Б., Жалолов. Ф.Б. Международной научно-технической конференции “Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта”. – Бухара. – 2024,– 27-28 сентября.

14. Safarov I.I., Mirzakabilov B.N. Natural vibrations of cylinder and spherical shell in elastic medium. Сборник материалов международной научной конференции: Механика, Сейсмостойкость, Машиностроение по проблемам «Обеспечения сейсмической безопасности и сейсмостойкости зданий и сооружений, решению прикладных задач механики», посвященной 90-летию академика АН РУз Т.Р. Рашидова. –Ташкент. – 2024. – II-Том, 27-29 Май. – С. 276-282

15. Ismoil Safarov, Bekzod Mirzakabilov. Harmonic waves in a cylindrical body located in an elastic medium. Tashkent international congress on modern sciences-III. Proceedings book. Tashkent chemical-technological institute, April 22-23, 2024 / TASHKENT. ISBN: 978-625-367-708-4. www.iksad.org.

16. Б. Мирзакабиллов, Ш. Алмуратов. Свободные колебания сферической оболочки с вязкоупругим наполнителем. Fizika-matematika fanlari doktori, professor Safarov Ismoil Ibrohimovich tavalludining 70 yilligiga bag‘ishlangan «Mехanika va matematikaning amaliy muammolari» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari to‘plami. –Toshkent. –2024. –406-413 b.

17. Нуриддинов Б.З, Рузимов А., Мирзакабиллов Б.Н. Колебания вязкоупругих элементов плоских механических систем. Fizika-matematika fanlari doktori, professor Safarov Ismoil Ibrohimovich tavalludining 70 yilligiga bag‘ishlangan «Mехanika va matematikaning amaliy muammolari» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari to‘plami. – Toshkent. – 2024. – 384-385 b.

18. Мирзакабиллов Н.Х, Мирзакабиллов Б.Н. Техник олий ўқув юртларида умуммуҳандислик фанларида математик моделлаштиришнинг ўзига хос жиҳатлари. Fizika-matematika fanlari doktori, professor Safarov Ismoil Ibrohimovich tavalludining 70 yilligiga bag‘ishlangan «Mехanika va matematikaning amaliy muammolari» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari to‘plami. – Toshkent. – 2024. – 342-346 b.

19. Мирзакабиллов Н.Х, Сафаров Ж.И, Мирзакабиллов Б.Н. Инновацион таълим мухитида техника олий ўқув юртлари билан ишлаб чиқаришнинг

интеграцияси бўйича қўйиладиган талаблар. Fizika-matematika fanlari doktori, professor Safarov Ismoil Ibrohimovich tavalludining 70 yilligiga bag'ishlangan «Mexanika va matematikaning amaliy muammolari» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari to'plami. –Toshkent. –2024. –314-318 b.

20. Мирзакабилов Н.Х, Мирзакабилов Б.Н. Механиканинг ривожланиш тарихига бир назар. Fizika-matematika fanlari doktori, professor Safarov Ismoil Ibrohimovich tavalludining 70 yilligiga bag'ishlangan «Mexanika va matematikaning amaliy muammolari» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari to'plami. –Toshkent. –2024. –307-310 b.

21. Болтаев З.И, Жумаева Х.Х, Мирзакабилов Б.Н., Шарипова Н.У. Линейные поперечные волны в цилиндрическом слое. Fizika-matematika fanlari doktori, professor Safarov Ismoil Ibrohimovich tavalludining 70 yilligiga bag'ishlangan «Mexanika va matematikaning amaliy muammolari» mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari to'plami. –Toshkent. –2024. –39-43 b.

22. Сафаров И.И., Усмонов Б.Ш., Нуриддинов Б.З, Мирзакабилов Б.Н. Распространение собственных вязкоупругих волн в тонкой панели с переменной толщиной. Сборник трудов XXXII научно-технической конференции молодых ученых, магистрантов и студентов бакалавриата «Перспективные химики-2024», посвященная году “Поддержки молодежи и бизнеса”. – Ташкент. – 2024. – С. 541-543

23. Safarov I.I., Mirzakabilov B.N. Tekis silindrik va sferik jismning elastik muhitda tabiiy tebranishi. «Umidli kimyogarlari-2024» XXXIII ilmiy-texnikaviy anjumanining maqolalar to'plami. –Toshkent. – 2024. –466-468 b.

24. Мухитдинов Р.Т., Алмуратов Ш.Н., Уролов У.А, Мирзакабилов Б.Н. О действии подвижных нагрузок на неподкреплённый цилиндрический тоннель. “Raqamli texnologiyalar asosida ta'lim jarayonini takomillashtirish” mavzusidagi Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyasi maqolalar to'plami.–Toshkent. –2024. –88-93 b.

25. Сафаров И.И., Мирзакабилов Б.Н. Контактные задачи линейно-деформируемого основания. Научная неделя “Зелёная химия и устойчивое развитие”, “Международные инновационные подходы в образовании, перспективы и текущие проблемы развития совместного образования” сборник трудов международной конференции. –Ташкент. –2023.–С. 238-240. <https://doi.org/10.47689/IIAE-CPDCE-vol1-iss1-2023>.

26. Н.У.Кулдашов, Ш.Н.Алмуратов, М.Чориев, В.Н.Мирзакабилов, М.Ш.Ахмедов. Нестационарные колебания сферических оболочек в вязкоупругой среде. Международная научно-практическая конференция «Рахматулинские чтения» Тезисы докладов. –Ташкент. –2023. –С. 168-169.

27. Mirzakabilov N.X., Mirzakabilov B.N. Подземные инженерные сооружения деформируемые с грунтом основания. International scientific-practical conference “Prospects for the development of digital energy systems, problems and solutions for obtaining renewable energy-2023”. – Jizzakh. –2023. – . –P. 562-565

28. З.И. Болтаев, Т.Р. Рузиев, Н. Отажонова, Б.Н. Мирзакабилов. Колебания плоских вязкоупругих элементов машиностроительных конструкций. «Современные проблемы прикладной математики, информатики и механики» Сборник трудов Международной научной конференции. – Том I. – Россия, Нальчик. – 2023. – С. 186-188

29. Safarov I.I., Mirzakabilov B.N. Анализ характеристики деформируемых сред и вопросы их взаимодействия с грунтом основания. «Umidli kimyogarlari-2023» XXXII ilmiy-texnikaviy anjumanining maqolalar to‘plami. –Toshkent, TKTI. – 2023. –519-523b.

30. Мирзакобилов Б.Н. “Бог‘ланишдаги механик системаларнинг барқарор ҳаракати устуворлигида ҳар хил кучларнинг таъсири”. Ўзбекистон Миллий университетининг 96 йиллигига бағишланган математика, механика ва информатика фанларининг ривожда истеъдодли ёшларнинг ўрни илмий-амалий семинари тезислари тўплами. – Тошкент. –2014. –108-109 б.

31. Mirzaqobilov B.N. “Mexanik sistema barqaror harakatiga har xil ko‘rinishdagi kuchlarni ta‘siri haqida”. Тезисы докладов Республиканской научной конференции с участием зарубежных ученых «Современные методы математической физики и их приложения». Институт математики при НУУз филиал МГУ им. М.В. Ломоносова. – Ташкент. –2015. – С. 198-199

32. N.X. Mirzakabilov, K. Axmedov, B.N. Mirzakabilov “Umummuhandislik fanlarida matematik modellashtirishning o‘ziga xos jihatlari”. Илмий-амалий анжумани Илмий мақолалар тўплами V-қисм “Техника ва технологияларни модернизациялаш шароитида иқтидорли ёшларнинг инновацион ғоялари ва ишланмалари”. –Тошкент. –2015. – 30-34 б.

33. Сагдиев Х.С., Тешабоев З.Р., Галиаскаров В.А., Шерниёзов Х.О., Мирзакобилов Б.Н. Методика экспериментальных исследований сейсмического воздействия взрывов в карьере Шавазсай на здания и их грунтовые основания. //Материалы Международной научно-технической конференции «Прочност конструкций, сейсמודинамика зданий и сооружений». –Ташкент. – 2016. – С. 177-180 (ФА-А14-Ф021).

34. Мирзакобилов Н.Х., Мирзакобилов Б.Н, Мирзакобилов Р.Н. Проблемы взаимодействия инженерных конструкций с деформируемым основанием «Фан техника таълим ва технологиялар: долзарб муаммолар ва ривожланиш тенденциялари» Республика илмий-техник анжумани материаллари тўплами (2-қисм). – Жиззах. – 2017. –201-203 б.

35. Сагдиев Х.С., Тешабоев З.Р., Галиаскаров В.А., Шерниёзов Х.О., Мирзакобилов Б.Н. Инструментально - расчетные исследования динамических характеристик уникального экспериментального здания на слоисто – эластомерных опорах. Сборник материалов международной конференции «Перспективы интенсивного подхода к инновационному развитию». – Наманган. – 2018. –Том II. – С. 327-330

36. Н. Мирзакобилов, Б. Мирзакобилов. “Некоторые задачи колебания вязкоупругой трехслойной пластинки”. Международная научная и научно-техническая конференции «Инновации в строительстве, конструкционная и сейсмическая безопасность зданий и сооружений». – Наманган. –2021. – С. 370-373

37. Мирзакобилов Б.Н, Турдалиев З.С. Механик боғланишдаги системаларнинг барқарор ҳаракати устуворлигида ҳар хил кучларнинг таъсири. «Ishlab chiqarishning texnik, muhandislik va texnologik muammolarining innovatsion yechimlari» xalqaro miqyosdagi ilmiy-texnik anjumani materiallari to‘plami. – Jizzax. – 2022. – 738-741 б.

**Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tilidagi matnlari
“IPAKYO‘LI” nashriyotida tahrirdan o‘tqizildi.**

**Bosishga ruxsat etildi: 13.03.2025.
Qog‘oz bichimi 60x84 1/16.
Temes New Roman garniturasida chop etildi.
Hajmi 3 bosma taboq. Adadi 100 nusxa. Buyurtma № 332.**

**“West Media Express” MCHJ bosmaxonasida chop etildi.
Bosmaxona manzili: Buxoro shahri,
Qayum Murtazoyev ko‘chasi 15A uy.
Tel: +998 93 080 39 00**

