

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

BUXORO MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

HOJIYEV AZIZJON XOLMURODOVICH

**QOVUSHQOQ-ELASTIK YARIM TEKISLIKDAGI SILINDRIK QOBIQDA
SIRT TO‘LQINLARINING YUKLANISHI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (Doctor of Philosophy) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Buxoro – 2025

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on Technical
Sciences**

Hojiyev Azizjon Xolmurodovich

Qovushqoq-elastik yarim tekislikdagi silindrik qobiqda sirt to'liqlarining
yuklanishi..... 3

Хожиев Азизжон Холмуродович

Нагрузки поверхностных волн на цилиндрической оболочке
находящейся в вязкоупругой полуплоскости..... 21

Khozhiyev Azizjon Kholmurodovich

Surface wave loading on a cylindrical shell located in a viscoelastic half-plane.. 39

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 45

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

BUXORO MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

HOJIYEV AZIZJON XOLMURODOVICH

**QOVUSHQOQ-ELASTIK YARIM TEKISLIKDAGI SILINDRIK QOBIQDA
SIRT TO‘LQINLARINING YUKLANISHI**

01.02.04 – Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi

**Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (Doctor of Philosophy) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Buxoro – 2025

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.1.PhD/T5207 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Buxoro muhandislik-texnologiya institutida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbar:

Boltayev Zafar Ixtiyorovich
fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

Rasmiy opponentlar:

Mavlanov To'liqin Mavlanovich
Texnika fanlari doktori, professor

Usmonov Botir Shukurillayevich
Texnika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Namangan davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Buxoro muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 raqamli Ilmiy kengash asosida tashkil qilingan bir martalik Ilmiy kengashning 2025-yil 23-may soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100118, Buxoro shahar, Qayum Murtazoyev ko'chasi 15-uy. Tel.: (+99865) 223-78-84; faks: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz).

Dissertatsiya bilan Buxoro muhandislik-texnologiya institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ 358 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100118, Buxoro shahar, Qayum Murtazoyev ko'chasi 15-uy. Tel.: (+99865) 223-78-84;).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil 8-may kuni tarqatildi.

(2025-yil 10 apreldagi № 1 raqamli reyestr bayonnomasi).



M.X. Teshayev

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

Sh.R. Axmedov

Ilmiy darajalar beruvchi bir martalik Ilmiy kengash ilmiy kotibi, texnika fanlari nomzodi, dotsent

B.S. Raxmonov

Ilmiy darajalar beruvchi bir martalik Ilmiy kengash qoshidagi bir martalik Ilmiy seminar raisi, texnika fanlari doktori (DSc)

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda zilzilabardosh bino va inshootlarni seysmik jihatdan faol bo'lgan hududlar uchun loyihalash va qurish uchun talofat ko'rishi yoki vayron bo'lishini oldini olish, sayoz o'rnatilgan yer osti inshootlarining deformatsiyalanuvchi konstruktiv elementlarini muhit bilan o'zaro ta'sirini o'rganish hamda hisoblash usullarini ishlab chiqish va qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida seysmik va seysmoportlash to'lqinlar ta'sirida yer osti inshootlarining (tonnellar, metropolitenlar, yer osti piyodalar o'tish yo'laklari, injenerlik kommunikatsiya tizimlari: suv, oqava suv, neft hamda gaz quvurlari va boshqalar) zilzilabardoshligi yuqori va tejamkor bo'lishini ta'minlovchi konstruksiyalarni amaliyotga joriy etishni taqazo etadi. Shu jihatdan, seysmik hududlarda yer osti quvurlari va kollektorlaridagi buzilishlar, zilzilalar va kuchli portlashlar natijasida yuzaga keladigan seysmik to'lqinlarning yer osti qobiqsimon inshootlarga ta'sirini hamda qobiqlarning mustahkamligini tadqiq qilishda materiallarning qovushqoq-elastiklik xususiyatini hisobga olib, dinamik kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini aniqlashning matematik modellarini va zamonaviy hisob usullaridan foydalanish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda ko'p qatlamli to'ldiruvchili kompozit silindrik qobiqlarga seysmik to'lqin ta'siri muammosining ilmiy asoslarini o'rganishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, mazkur yo'nalishlarda maqsadli ilmiy tadqiqotlarni amalga oshirish, nazariyasini rivojlantirish, ilmiy asosini takomillashtirish, hisoblash usullarini ishlab chiqishga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda qurilish va texnika sohasida turli dinamik yuklanishlar ta'siri ostida bo'lgan yer osti kompozit qobiqlarni amaliyotda tadbiiq etish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amakga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. 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"¹ gi qarori, 2024 yil 17 apreldagi PQ-161-sonli "Bino va inshootlarning zilzilabardoshliligini oshirish hamda seysmik xavfni monitoring qilish faoliyatini takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"² gi qarorlarida muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, yer osti qurilish konstruksiyalarining mustahkamligi va raqobatbardoshligini ta'minlash uchun takomillashtirilgan matematik modellarini, samarali hisoblash usullarini ishlab chiqish va rivojlantirish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 30-iyuldagi PQ-4794-sonli "O'zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini tubdan takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"³ Qarori, "Matematika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy-tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari

¹O'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

²O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024 yil 17 apreldagi PQ-161-sonli "Bino va inshootlarning zilzilabardoshliligini oshirish hamda seysmik xavfni monitoring qilish faoliyatini takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida

³ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining PQ-4794-sonli qarori. "O'zbekiston Respublikasi aholisi va hududining seysmik xavfsizligini ta'minlash tizimini tubdan takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida". 30.07.2020-y.

to'g'risida" PQ-4708-sonli 2020-yil 7-maydagi Prezident Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar taraqqiyotining ustuvor yo'nalishiga mosligi. Mazkur dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining IV. "Matematika, mexanika va informatika" ustuvor yo'nalishiga mos ravishda bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Qovushqoq-elastik yarim tekislikdagi silindrik qobiqa sirt va hajmiy to'lqinlarning yuklanishi masalalari ilmiy nuqtayi nazardan quyidagi taniqli chet el olimlari tomonidan o'rganilgan: A.A.Ilyushin, A.G.Gorshkov, A.S.Volmir, Y.I.Shemyakin, A.N.Guz, I.Y.Troyanovskiy, I.A.Kiyko, L.A.Molotkov, Y.I.Novichkov, P.V.Krauklis, L.I.Slepyan, V.P.Matveenko, I.N.Shardakov, E.I.Starovoytov, N.S.Anofrikova va boshqalar.

Bu muammoni yechishda O'zbekiston olimlari M.T.Urazbayev, T.Sh.Shirinqulov, X.A.Raxmatulin, V.K.Kabulov, T.R.Rashidov, Y.N.Muborakov, B.M.Mardonov, K.S.Sultanov, Sh.M.Mamatqulov, M.M.Mirsaidov, F.B.Badalov, G.X.Xojmetov, A.A.Ishanxodjayev, T.M.Mavlonov, I.K.Mirzayev, A.A.Abdusattorov, I.I.Safarov, X.X.Xudaynazarov, B.E.Xusanov, B.S.Raxmonov, M.X.Teshayev, Sh.S.Yuldashev, S.A.Abduqodirov, M.K.Usarov va boshqalar o'z hissalarini qo'shib kelishmoqda. Ular materialning reologik xususiyatlarini hisobga olib, turli formadagi (sterjin, silindrik va sferik jismlar) yer osti inshootlariga seysmik va portlash to'lqinlarning ta'sirini o'rganish usullarini va hisoblash algoritmlarini ishlab chiqishni rivojlantirishgan. Yuqoridagilarga qaramay, hozirgi vaqtda o'z yechimini topmagan bir qator muammolar mavjud. Ko'pgina ishlarda inshootlar chuqur ko'milgan deb olingan, yer sirtini va sirt to'lqinlarni hisobga olish dolzarb muammo hisoblanadi. Dissipativ bir jinsli bo'lmagan to'lqin o'tkazgichlardagi dinamik jarayonlarni o'rganish deformatsiyalanuvchan qattiq jismlar dinamikasini nazariy jihatdan qanchalik ko'p boyitsa, uning energiya dissipatsiyasi bilan bog'liq bo'lgan yangi natijalari muhim amaliy ahamiyatga ega bo'lgan ko'pgina muammolarni yechishga imkon yaratadi.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya Buxoro muhandislik-texnologiya instituti ilmiy tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq FM-01-2020-2024 "Qovushqoq-elastik jismlardagi mexanik jarayonlarni matematik modellashtirish" loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi qovushqoq-elastik yarim fazoda joylashgan silindrik qobiqqa sirt to'lqinlari yuklanishi masalasining matematik qo'yilishi, yechish metodikasi va algoritmlarini ishlab chiqishdan hamda sonli natijalar olib tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

qovushqoq-elastik yarim fazoda joylashgan silindrik qobiqqa bo'ylama, ko'ndalang va sirt (Reley) to'lqinlari ta'sirida hosil bo'ladigan dinamik kuchlanganlik-deformatsiya holatini topish masalasining matematik qo'yilishi, yechish metodikasi va algoritmini ishlab chiqish;

qovushqoq-elastik silindrik qobiqqa bo'ylama va ko'ndalang to'lqin yuklanishi natijasida qobiq va uni o'rab turuvchi muhitdagi dinamik kuchlanish-deformatsiya holatiga solishtirma baho berish;

qovushqoq-elastik yarim tekislikdagi silindrik qobiqda sirt (Reley) to'liqini ta'sirida hosil bo'ladigan dinamik kuchlanganlik deformatsiya holatini chekli elimentlar usuli orqali tadqiq qilish;

sirt to'liqining (Reley) mustahkamlanmagan silindrik bo'shliq sathidagi kuchlanishlar yig'ilishiga solishtirma baho berish.

Tadqiqotning obyekti sifatida silindrik qobiq olingan.

Tadqiqotning predmetini uzun qovushqoq-elastik silindrik qobiqqa bo'ylama yoki ko'ndalang hamda sirt to'liqlari yuklanishining geometrik va fizik-mexanik parametrlarga bog'liq holda so'nishini butun sistema bo'yicha baholash masalalari tashkil etadi.

Tadqiqot usullari. Tadqiqot jarayonida elastiklik nazariyasi deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasining xususiy hosilali integro-differensial tenglamalarini yechish uchun deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi va matematik-fizikaning maxsus funksiyalari orqali yechimni topish, Myuller va Furening integral almashtirishlari, Gauss usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

qovushqoq-elastik yarim fazoda joylashgan silindrik qobiqqa bo'ylama va ko'ndalang hamda sirt (Reley) to'liqlari ta'sirida hosil bo'ladigan dinamik kuchlanganlik-deformatsiya holatini topish masalasi matematik qo'yilgan, analitik va sonli yechish usuli va algoritmi ishlab chiqilgan;

qovushqoq-elastik silindrik qobiqqa sirt to'liqin yuklanishi natijasidagi kuchlanish-deformatsiya holatiga ko'milish chuqurligining ta'siri tushuvchi to'liqinning uzunligiga bog'liqligi va chuqurlik oshishi bilan ko'chishlarni eksponensial kamayib borishi topilgan;

qovushqoq-elastik yarim tekislikdagi silindrik qobiqda garmonik davriy kuch ta'sirida tarqalgan to'liqin natijasida hosil bo'ladigan dinamik kuchlanishlar deformatsiya holatining ko'milish chuqurligi, majburiy kuch chastotasi va garmonik kuch amplitudasiga bog'liqligi aniqlangan;

silindrik qobiqning kuchlanganlik-deformatsiya holatiga uzun to'liqlar sohasida statik holat kuchlanishidan 20 % gacha ko'p bo'lishi topilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

ko'p qatlamli suyuqlikli kompozit silindrik qobiqlarga seysmik to'liqin yuklanishi oqibatida hosil bo'ladigan kuchlanishlar va deformatsiya holati uchun silindrik jismlar mustahkamligini hisoblash usullari ishlab chiqilgan;

ko'p qatlamli suyuqlikli kompozit silindrik qobiqqa seysmik to'liqin yuklanishi spektral masalada kompleks chastotalarning chekli sondagi modalarini topish muammosi hal qilingan;

ko'p qatlamli suyuqlikli kompozit silindrik qobiqlarga seysmik va bo'ylama yoki ko'ndalang to'liqin yuklanish ostidagi deformatsiyalanuvchi muhit va silindrik qobiq bilan himoyalangan silindrik bo'shliqdagi kuchlanishlar taqsimoti aniqlangan;

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi chegaraviy va spektral masalalarning correct qo'yilishi, keltirib chiqarilgan matematik munosabatlarning qat'iyiligi asosida yechish usullaridan tizimli foydalanish va boshqa olimlarning olgan yechimlari bilan taqqoslashlar orqali asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati elastik muhitda joylashgan quvur o'tkazgichlarga to'liqin yuklanishi va difraksiyasi nazariyasining rivojlanishiga

salmoqli hissa qo'shish bilan izohlanadi.

Tadqiqot ishining amaliy ahamiyati elastik muhitda joylashgan aniq parametrlarga ega bo'lgan, quvur o'tkazgichlarga to'liq yuklanishi oqibatida hosil bo'ladigan kuchlanishlar va deformatsiya holatining yangi qonuniyatlarini o'rganish imkoniyatining paydo bo'lishi, chegaraviy va spektral masalada kompleks chastotalarning chekli sondagi modalarini topish muammosining hal qilinishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Tadqiqotdagi qovushqoq-elastik yarim tekislikdagi silindrik qobiqda sirt to'liqlarning yuklanishi holatini hisoblash usullari va algoritmi bo'yicha olingan natijalar asosida:

dissertatsiyada ishlab chiqilgan to'liq funksiyasining xos formalar bo'yicha yoyish usulidan Buxoro muhandislik-texnologiya institutida 2012-2016-yillarda bajarilgan F-4-14 raqamli "Suyuqlik oquvchi yer osti egri chiziqli quvurning tashqi kuchlari ta'siridagi kuchlanish-deformatsiyalar holatini tadqiq qilish nazariyasini rivojlantirish va hisoblab chiqish" mavzusidagi fundamental loyihada foydalanilgan (Buxoro muhandislik-texnologiya institutining 2025-yil 6-yanvardagi № 1-1-01/04-70-son ma'lumotnomasi). Natijada qovushqoq suyuqlik oquvchi ko'p qatlamli kompozit sayyoz ko'milgan quvurlar liniyasining ta'sir omillari formalarini aniqlashga imkon bergan;

birinchi tartibli bir jinsli xususiy hosilali differensial tenglamalarni yechish metodikasidan Toshkent kimyo-texnologiya institutida 2016-2020-yillarda bajarilgan OT-F4-01 "Qovushqoq suyuqlik oquvchi ko'p qatlamli kompozit quvurlar egri chiziqli bo'laklarining harorat va dinamik yuklanishlar ta'sirida chiziqli bo'lmagan dinamik kuchlanish-deformatsiya holatini o'rganish usullarini ishlab chiqish va nazariyasini rivojlantirish" mavzusidagi fundamental loyihada foydalanilgan (Toshkent kimyo-texnologiya institutining 2024-yil 27-avgustdagi № 1/01-2247-sonli ma'lumotnomasi). Natijada qovushqoq-elastik silindrik qobiqqa hajmiy to'liq yuklanishidagi kuchlanish-deformatsiya holatini va so'nishini xarakterlovchi dispersion munosabatlar aniqlangan;

dissertatsiyada aniqlangan R to'liqning yer sirtida ta'siri natijasida, silindrik qobiqdagi o'q bo'yicha siljish va egilish kuchlanishi $0.135 \leq \frac{h}{\lambda} \leq 0.163$ oralig'ida o'zining eng katta qiymatiga erishish samarasidan hamda inshootlarning tutash muhandislik quvurlarining seysmik bardoshlilikini ta'minlash usullaridan "Uzjamoaloyiha" va "Qurilishloyiha" MChJlarda foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining Seysmik xavfsizlikni ta'minlash masalalarini muvofiqlashtirish bo'limining 2024-yil 10-dekabrdagi №25/1-1114-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, rezonans hodisasi sodir bo'lishi mumkin bo'lgan sohalarini oldindan aniqlash darajasi 20% gacha oshgan va materiallar reologik parametrlarini tanlash hisobidan konstruksiyalarning engil, tejamkor va xizmat qilish bardavomligini 30% gacha oshirish imkoniyati yaratilgan.

Tadqiqot natijalarning e'lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 14 ta ilmiy ish chop etilgan, jumladan, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 6 ta maqola, shulardan 3 tasi respublika va 3 tasi xorijiy ilmiy jurnallarida nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 107 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

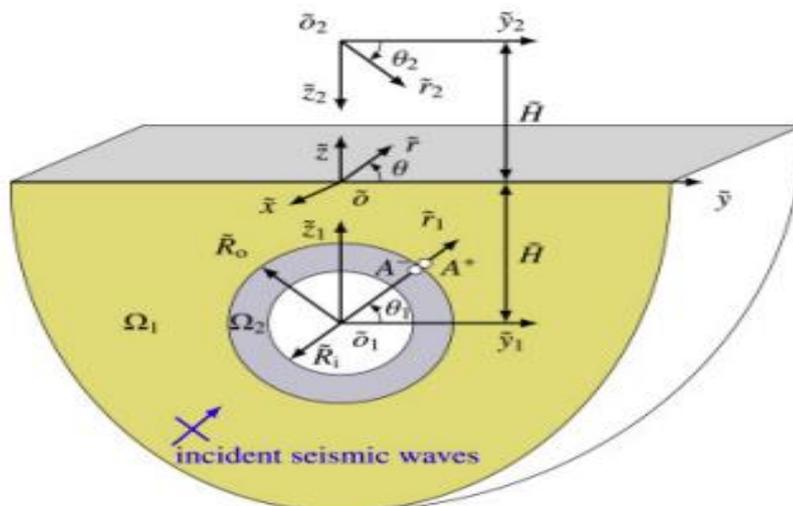
Kirish qismida dissertatsiya tadqiqotining dolzarbligi va zaruriyati asoslab berilgan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obyekt va predmetlari shakllantirilgan. Tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi ko'rsatilgan, tadqiqotning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

Dissertatsiyaning **“Deformatsiyalanuvchi yarim tekislikdagi silindrik qobiqa seysmik (sirt va hajmiy) to'lqinlar yuklanishidan hosil bo'lgan kuchlanishlar-deformatsiya holatini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili”** deb nomlangan birinchi bobida hajmiy va sirt to'lqinlar ta'sirida sayoz o'rnatilgan silindrik (ko'ndalang kesimi turlicha bo'lgan) quvurlarning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlarning qisqacha tahlili keltirilgan hamda adabiyotlar tahlili asosida xulosalar qilingan. Bu bob uch paragrafdan iborat. Birinchi paragrafi “Deformatsiyalanuvchi yarim tekislikda joylashgan silindrik qobiqlarga to'lqin yuklanishi va difraksiyasini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili” deb nomlanadi. Unda seysmik zonada gruntli muhitda joylashgan silindrsimon qobiqlar, quvur o'tkazgichlarining tuzilmalari, metro tonnolari, gaz omborlari va boshqa yer osti inshootlarining zilzila bardoshligini o'rganishga bag'ishlangan adabiyotlarning qisqacha tahlili keltirilgan. Bu bobning ikkinchi paragrafi “Elastik muhitda joylashgan aniq parametrlarga ega bo'lgan, quvur o'tkazgichlarning xususiy tebranishlar chastotasi va so'nish koeffitsiyentini aniqlashga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili” deb nomlangan. Bu paragrafda seysmik hududlarda quvurlarni loyihalashda ulaarning zilzila zo'riqlashlariga bardosh beradigan, xavfsiz va tejamkor bo'lgan va shu bilan birga, boshqa tabiiy va texnogen xavf-xatarlarga qarshi kurashda qo'llaniladigan yechimlarga mos keladigan konstruktiv yechimlarni ishlab chiqishga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili keltirilgan. Uchinchi paragraf “Zilzilabardosh qurilish bo'yicha zamonaviy seysmik me'yoriy qoidalar tahlili (QMQ)” deb nomlanadi. Unda seysmik yuklanishlar ta'siridagi yupqa devorli tonnolarni hisoblashga bag'ishlangan adabiyotlar tahlil etilgan. Ularni hisoblashda fazoviy holatni hisobga olish va hisoblash usullarini takomillashtirish zarurligi ko'rsatib o'tilgan.

Dissertatsiyaning **“Qovushqoq- elastik yarim tekislikdagi silindrik qobiqqa seysmik to'lqin (sirt va hajmiy)larning yuklanishi masalasining qo'yilishi, yechish metodikasi va algoritimi”** deb nomlangan ikkinchi bobida seysmik to'lqin ta'siridagi qovushqoq- elastik yarim tekislikdagi silindrik qobiqning dinamik kuchlanganlik- deformatsiya holatini topish va tahlil qilish muammosining matematik qo'yilishi, yechish metodikasi va algoritmi keltirilgan. Yupqa silindrik qobiqlar uchun Kirxgof-Lyav gipotezasi o'rinli bo'lgan qobiqning harakat differensial tenglamasi, qalin silindrlar uchun deformatsiyalanuvchan jismlar mexanikasining qovushqoq-elastiklik nazariyasining tenglamalaridan foydalanildi. U holda ko'p qatlamli qobiq

(yoki qalin devorli silindr)lardan tashkil topgan mexanik sistemaning harakat tenglamalari quyidagicha bo‘ladi:

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



1-rasm. Deformatsiyalanuvchi yarim fazoda joylashgan silindrik qobiqqa to‘lqin yuklanishining hisob sxemasi

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

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

$$\Delta \phi_0 - \frac{1}{c_\infty^2} \ddot{\phi}_0 = 0. \quad (3)$$

Agar silindrik qatlam qovushqoq suyuqlik bilan to‘ldirilgan bo‘lsa, u holda (3) tenglama orqali ifodalanadi.

Agar silindrik qobiq qatlamlardan tashkil topgan bo‘lsa, u holda uning harakati tenglamalari (1) va (2) ko‘rinishda bo‘ladi. Quyidagicha kontakt va chegaraviy shartlar qo‘yiladi:

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

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

2. Qatlamlar orasida massasiz element qo‘yilgan bo‘lsa, u holda chegaraviy (kontakt) shartlari, tekis deformatsiya holati uchun, quyidagicha bo‘ladi:

$$\begin{aligned} r = a_k: \quad \sigma_{rrk} &= \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)}; \\ \sigma_{rrk} &= \bar{k}_r (u_{rk} - u_{r(k+1)}); \\ \sigma_{r\theta k} &= \bar{k}_\theta (u_{\theta k} - u_{\theta(k+1)}). \end{aligned} \quad (5)$$

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

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

4. Agar radial koordinata cheksizlikka intilsa, u holda bo‘ylama va ko‘ndalang to‘lqin

potensiallari Zommerfeldning yutilish shartini qanoatlantiradi

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

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

Faraz qilaylik, inshoot muhit bilan massasiz deformatsiyalanuvchi elementlar (inersiyasiz element) orqali aloqada bo'lsin. Buni Vinkler asosi ham deyiladi. Bu silindrik quvur uchun silindrik koordinatalar sistemasida quyidagicha bo'ladi:

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k; \quad q_{1\theta}^k = 0, \quad (8)$$

$$\tilde{k}_r^k [f(t)] = k_{r0}^k \left[f(t) - \int_0^t R_k(t-\tau) f(\tau) d\tau \right],$$

k_{r0}^k – oniy postel koeffitsiyenti, $R_k(t-\tau)$ – relaksatsiya yadrosi.

Vinkler asosi olinganda, (8) dan foydalanilganda, inersiya kuchini ham hisobga olganda, quyidagicha aniqlanadi:

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k - m_f \ddot{w}^k, \quad (9)$$

bunda m_f – asosning samarali massasi.

Endi 1-rasmda tasvirlangan silindrik jism uchun kontakt va chegaraviy shartlarni qo'yamiz

$$\sigma_{\bar{z}\bar{z}}^{(1)} = \sigma_{\bar{z}\bar{y}}^{(1)} = \sigma_{\bar{z}\bar{x}}^{(1)} = 0, \quad \bar{z} = 0,$$

$$\sigma_{\bar{r}_1\bar{r}_1}^{(2)} = \sigma_{\bar{r}_1\theta_{11}}^{(2)} = \sigma_{\bar{r}_1\bar{z}_1}^{(2)} = 0, \quad \bar{r}_1 = \tilde{R}_1,$$

$$u_{\bar{r}_1}^{(1)} = u_{\bar{r}_1}^{(2)}, u_{\theta_1}^{(1)} = u_{\theta_1}^{(2)}, u_{\bar{z}_1}^{(1)} = u_{\bar{z}_1}^{(2)}, \quad \bar{r}_1 = \tilde{R}_0,$$

$$\sigma_{\bar{r}_1\bar{r}_1}^{(2)} = \sigma_{\bar{r}_1\theta_{11}}^{(2)} = \sigma_{\bar{r}_1\bar{z}_1}^{(2)} = 0, \quad \bar{r}_1 = \tilde{R}_1, \quad (10)$$

$$\sigma_{\bar{r}_1\bar{r}_1}^{(1)} = \sigma_{\bar{r}_1\bar{r}_1}^{(2)}, \sigma_{\bar{r}_1\theta_1}^{(1)} = \sigma_{\bar{r}_1\theta_1}^{(2)}, \sigma_{\bar{r}_1\bar{z}_1}^{(1)} = \sigma_{\bar{r}_1\bar{z}_1}^{(2)}, \quad \bar{r}_1 = \tilde{R}_0.$$

Muhitda tarqalayotgan silindrik va tekis to'lqinlar, tekis deformatsiya holati uchun, quyidagicha bo'ladi:

$$1. \varphi^{(p)} = A e^{i(\alpha x - \omega t)}, \psi^{(p)} = 0; \quad 2. \psi^{(p)} = A e^{i(\beta x - \omega t)}, \varphi^{(p)} = 0. \quad (11)$$

Agar grunt sirtida Reley to'lqini tarqalsa, u holda gruntning ko'chishi, izotrop muhit uchun, quyidagicha bo'ladi:

$$U_x = \frac{1}{2} A \left[2e^{b_1 y} - \left(2 - \frac{V_R^2}{V_s^2} \right) e^{b_2 y} \right] \cos(x - V_R t),$$

$$U_y = \frac{1}{4} A \frac{\left(2 - \frac{V_R^2}{V_s^2} \right)}{\sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_s^2}}} \left[\left(2 - \frac{V_R^2}{V_s^2} \right) e^{b_2 y} - 2e^{b_1 y} \right] \sin(x - V_R t), \quad (12)$$

$$b_1 = k \sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_p^2}}, b_2 = k \sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_s^2}},$$

bunda U_x va U_y – mos ravishda muhit sirti nuqtalarining x va y koordinata o'qlari bo'yicha ko'chishlari; A – to'lqin amplitudasi; V_R , V_s va V_p – mos ravishda Reley, ko'ndalang va bo'ylama to'lqin tezliklari, $k = 2\pi/\lambda$, λ – to'lqin uzunligi, t – vaqt.

Silindrik qobiq va uni o‘rab turuvchi muhitning xususiyl hosilali differensial tenglamasining ko‘chish vektorini bo‘ylama va ko‘ndalang to‘lqin potentsiallari orqali ifodalaymiz

$$\vec{u}_j = \text{grad}\phi_j + \text{rot}\vec{\psi}_j, \text{div}\vec{\psi} = 0. \quad (13)$$

Asosiy masalalar elastiklik nazariyasining tekis deformatsiya holati masalasiga olib kelinadi. Shuning uchun bo‘ylama ϕ_j va ko‘ndalang $\vec{\psi}_j(\psi_{zj}, 0, 0)$ to‘lqin potentsiallari quyidagi integro differensial tenglamalarni qanoatlantiradi:

$$\Gamma_{\lambda\mu\kappa} \nabla^2 \varphi_k - \frac{1}{c_{p0k}^2} \frac{\partial^2 \varphi_k}{\partial t^2} = 0; \quad \Gamma_{\mu\kappa} \nabla^2 \psi_z - \frac{1}{c_{s0k}^2} \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial t^2} = 0; \quad (14)$$

(14) tenglamalarning yechimi quyidagicha bo‘ladi:

$$\begin{aligned} \varphi_j &= \sum_{n=0}^{\infty} [A_{nj} H_n^{(1)}(\alpha_j r) + A'_{nj} H_n^{(2)}(\alpha_j r)] \cos n\theta e^{-i\omega t}; \\ \psi_j &= \sum_{n=0}^{\infty} [B_{nj} H_n^{(1)}(\beta_j r) + B'_{nj} H_n^{(2)}(\beta_j r)] \sin n\theta e^{-i\omega t}; \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \\ \varphi_N &= \sum_{n=0}^{\infty} [C_{nN} H_n^{(1)}(\alpha_N r) + D_{nN} H_n^{(2)}(\alpha_N r)] \cos n\theta e^{-i\omega t}, \\ \psi_N &= \sum_{n=0}^{\infty} [M_{nN} H_n^{(1)}(\beta_N r) + L_{nN} H_n^{(2)}(\beta_N r)] \sin n\theta e^{-i\omega t}, \\ \varphi_0 &= \sum_{n=0}^{\infty} [K_{n0} J_n(\alpha_0 r) + K'_{n0} N_n(\alpha_0 r)] \cos n\theta e^{-i\omega t}. \end{aligned} \quad (15)$$

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‘zgarimas 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 $H_n^{(1),(2)}(\alpha r) = J_n(\alpha r) \pm iN_n(\alpha r)$.

Silindrik va dekart koordinatalar sistemasini bog‘lovchi munosabat quyidagicha bo‘ladi:

$$\begin{bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_x \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_x \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & \sigma_{r\theta} & \sigma_{rx} \\ \sigma_{\theta r} & \sigma_{\theta\theta} & \sigma_{\theta x} \\ \sigma_{xr} & \sigma_{x\theta} & \sigma_{xx} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \sigma_{yy} & \sigma_{yz} & \sigma_{yx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{zz} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xx} \end{bmatrix} T^T. \quad (16)$$

Bu yerda T – almashtirish matritsasi, T^T – transponirlangan matritsa.

Birichi holda silindrik jismga bo‘ylama hajmiy to‘lqin tushsin. U holda tushuvchi va qaytuvchi to‘lqinlar quyidagicha bo‘ladi:

$$\begin{aligned} \varphi^{(p)} &= \phi_0 e^{-i(k_x^{(1)}x + k_y^{(1)}y + k_z^{(1)}z)}, \quad \varphi^{(s)} = R_{\phi, \phi} \phi_0 e^{-i(k_x^{(1)}x + k_y^{(1)}y - k_{z,p}^{(1)}z)}, \\ \psi^{(s)} &= R_{\psi, \phi} \phi_0 e^{-i(k_x^{(1)}x + k_y^{(1)}y - k_{z,s}^{(1)}z)}, \quad \chi^{(s)} = R_{\chi, \phi} \phi_0 e^{-i(k_x^{(1)}x + k_y^{(1)}y - k_{z,s}^{(1)}z)}, \end{aligned} \quad (17)$$

bunda (p) – tushuvchi to‘lqinni, (s) – qaytgan to‘lqinni ifodalaydi. To‘lqin sonlari quyidagicha topiladi: $k_x^{(1)} = k_{x,p}^{(1)} = -k_p^{(1)} \sin \theta_v \cos \theta_h$, $k_y^{(1)} = k_{y,p}^{(1)} = k_p^{(1)} \sin \theta_v \sin \theta_h$.

To‘lqin sonlari $k_{z,p}^{(1)}$ va $k_{z,s}^{(1)}$ mos ravishda z o‘qi bo‘yicha bo‘ylama va

siljish to‘lqin sonlarini ifoda qiladi

$$k_{z,p}^{(1)} = \sqrt{(k_p^{(1)})^2 - (k^{(1)})^2}, \quad k_{z,s}^{(1)} = \sqrt{(k_s^{(1)})^2 - (k^{(1)})^2},$$

bunda $\operatorname{Re}(k_{z,p}^{(1)}) > 0$ va $\operatorname{Re}(k_{z,s}^{(1)}) > 0$. U holda $\omega > 0$ deb olinadi. To‘lqin soni $k^{(1)}$ (x,y) tekisligida quyidagicha aniqlanadi: $k^{(1)} = \sqrt{(k_x^{(1)})^2 - (k_y^{(1)})^2}$. To‘lqin dinamikasining Snella qonuniga asosan x yo‘nalishidagi qaytuvchi bo‘ylama va ko‘ndalang to‘lqin uchun $k_{x,p}^{(1)} = k_{x,s}^{(1)} = k_x^{(1)}$. Silindrik qobiqdan qaytgan to‘lqinlar va uni Gelmgols tenglamasi orqali olingan yechimlari “s,1”maydon uchun Xankelning 1 va 2 jinsli n-tartibli funksiyalar orqali ifodalanadi:

$$\begin{aligned} \varphi_{s,1}^{(1)} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n H_n^{(2)}(k_a^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_1 - k_x^{(1)} x)}, \quad \psi_{s,1}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n H_n^{(2)}(k_b^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_1 - k_x^{(1)} x)}, \\ \chi_{s,1}^{(1)} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}(k_a^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_1 - k_x^{(1)} x)}, \quad \varphi_{s,2}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n H_n^{(2)}(k_a^{(1)} r_2) e^{i(n\theta_2 - k_x^{(1)} x)}, \\ \varphi_{s,1}^{(1)} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} e_n H_n^{(2)}(k_b^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_2 - k_x^{(1)} x)}, \quad \varphi_{s,1}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n H_n^{(2)}(k_b^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_2 - k_x^{(1)} x)}, \end{aligned}$$

Bu yerda $a_n, b_n, c_n, d_n, e_n, f_n$ – ixtiyoriy integrallash doimiylari,

$$k_a^{(1)} = \sqrt{(k_p^{(1)})^2 - (k_x^{(1)})^2}, \quad k_b^{(1)} = \sqrt{(k_s^{(1)})^2 - (k_x^{(1)})^2}, \quad \operatorname{Re}(k_a^{(1)}) > 0 \quad \text{va} \quad \operatorname{Re}(k_b^{(1)}) > 0.$$

Bu holat grunda so‘nuvchi silindrik to‘lqin $\operatorname{Im}(k_a^{(1)}) < 0$ tarqalishi sifatida qabul qilinadi.

Ixtiyoriy o‘zgarmaslarni topish uchun chegaraviy shartlar (6) - (9) dan foydalansak, bir jinsli bo‘lmagan kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalar sistemasini olamiz

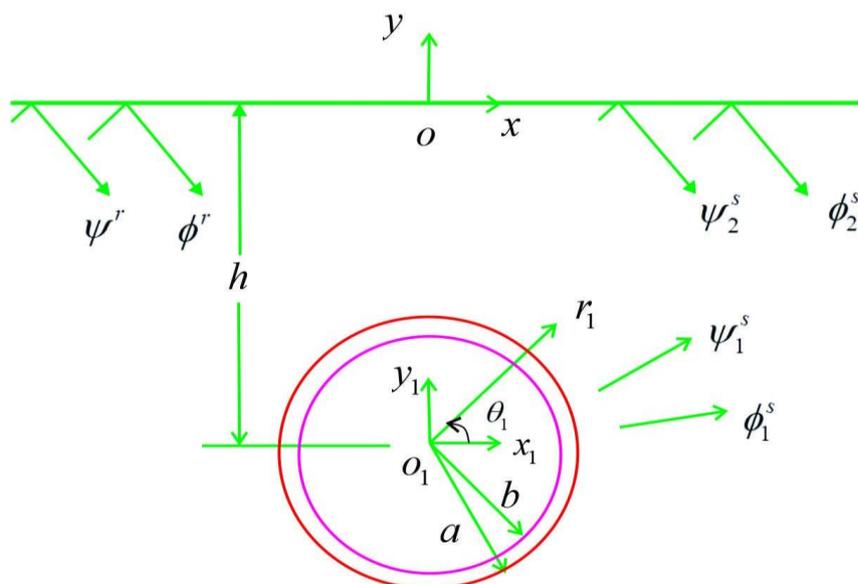
$$[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)] \{q\} = \{P_1\}, \quad (18)$$

bunda $\{q\}$ – vektor ustun bo‘lib, ixtiyoriy o‘zgarmaslardan tashkil topgan; $\{R\}$ – tashqi tushadigan to‘lqin ta’siri vektori; $[C_1]$ – kvadrat matritsa, elementlari Bessel va Xankel funksiyalaridan tashkil topgan. Kontur kuchlanishi $\sigma_{\theta\theta}$

$$\sigma_{\theta\theta}|_{r=0} = (\operatorname{Re} + iJ_m) e^{-i\alpha r} = \sqrt{\operatorname{Re}^2 + J_m^2} e^{-i(\alpha r - \gamma)}, \quad \gamma = \arctg \frac{J_m}{\operatorname{Re}} \quad (19)$$

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

Dissertatsiyaning **“Qovushqoq-elastik yarim tekislikda bo‘lgan silindrik qobiqa hajmiy seysmik to‘lqin yuklanishi xususiyatlari”** deb nomlangan uchinchi bobida qovushqoq-elastik yarim tekislikda joylashgan qobiqqa bo‘ylama yoki ko‘ndalang hajmiy to‘lqin yuklanishi va difraksiyasi masalasi yechiladi. Bu bob uchta paragrafdan iborat. Birinchi paragrafda Qovushqoq-elastik yarim tekislikda bo‘lgan silindrik qobiqqa hajmiy seysmik to‘lqin yuklanishi masalasining qo‘yilishi va yechish metodikasi keltirilgan. Ikkinchi paragrafda sonli natijalar va ularning tahlili keltirilgan.



2-rasm. Qovushqoq –elastik yarim tekislikda joylashgan silindrik qobiqqa hajmiy to‘lqin yuklanishining hisob sxemasi

Tushuvchi bo‘ylama va ko‘ndalang to‘lqinlar quyidagi munosabatlar orqali aniqlanadi:

$$\varphi^{(f)} = \varphi^{(p)} + \varphi^{(r)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n J_n(k_{\alpha 1} r_1) e^{in\theta_1}, \psi^{(r)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n J_n(k_{\beta 1} r_1) e^{in\theta_1}. \quad (20)$$

Bu yerda a_n va b_n ($n=0,1,2,\dots$) ixtiyoriy integral doimiylari. (20)- formulada tushuvchi bo‘ylama garmonik to‘lqinning yarim tekislik erkin sathidan qaytishi ifoda qilingan. Silindrik qobiqdan qaytgan to‘lqinlar quyidagicha ifodalanadi:

$$\varphi_1^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(k_{\alpha 1} r_1) e^{in\theta_1}, \psi_1^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(k_{\beta 1} r_1) e^{in\theta_1}, \quad (21)$$

bu yerda A_n va B_n – ixtiyoriy integrallash doimiylari. Bu(21) yechim cheksizlikda Zommerfeld yutilish shartini qanoatlantiradi. k_{α} va k_{β} bo‘ylama va ko‘ndalang to‘lqin sonlari mos ravishda. Qovushqoq-elastik muhit uchun $k_{\alpha k} = \omega / c_{\alpha k} \Gamma_{\alpha k}, k_{\beta k} = \omega / c_{\beta k} \Gamma_{\beta k}$ lar kompleks kattalik hisoblanadi. Silindrik qobiqdan qaytgan to‘lqinning erkin sathdan qaytishi ham quyidagicha olinadi:

$$\varphi_2^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{2n} J_n(k_{\alpha 1} r_1) e^{in\theta_1}, \psi_2^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_{2n} J_n(k_{\beta 1} r_1) e^{in\theta_1} \quad (22)$$

Tushuvchi va qaytuvchi bo‘ylama va ko‘ndalang to‘lqin potentsiallari quyidagicha bo‘ladi:

$$\varphi^0 = \varphi^{(f)} + \varphi_1^{(s)} + \varphi_2^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [(a_n + A_{2n}) J_n(k_{\alpha 1} r_1) + A_{1n} H_n^{(1)}(k_{\alpha 1} r_1)] e^{in\theta_1},$$

$$\psi^0 = \psi^{(f)} + \psi_1^{(s)} + \psi_2^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [(b_n + B_{2n}) J_n(k_{\beta 1} r_1) + B_{1n} H_n^{(1)}(k_{\beta 1} r_1)] e^{in\theta_1}, \quad (23)$$

bu yerda $A_{1n}, A_{2n}, B_{1n}, B_{2n}$ – ixtiyoriy integral doimiylari. Ko‘rinib turibdiki, to‘lqin potentsiallari orqali barcha tushuvchi va qaytuvchi to‘lqinlar ta‘sirini hisobga oldik. Silindrik qobiq uchun to‘lqin tenglamasining yechimi quyidagicha bo‘ladi:

$$\varphi^c = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [C_{1n} H_n^{(1)}(k_{\alpha 2} r_1) + C_{2n} H_n^{(2)}(k_{\alpha 2} r_1)] e^{in\theta_1},$$

$$\psi^c = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [D_{1n} H_n^{(1)}(k_{\beta 2} r_1) + D_{2n} H_n^{(2)}(k_{\beta 2} r_1)] e^{in\theta_1},$$
(24)

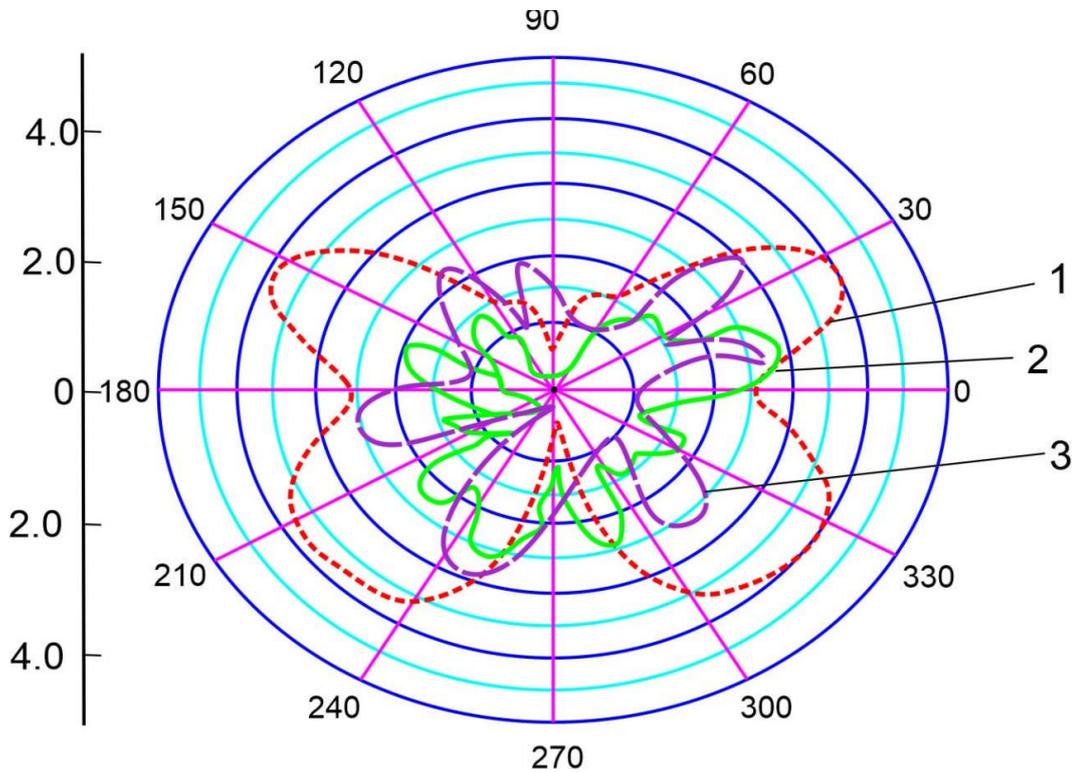
bu yerda $C_{1n}, C_{2n}, D_{1n}, D_{2n}$ – ixtiyoriy integral doimiylari. Agar silindrik qobiqqa ko‘ndalang to‘lqin kelib tushsa, u holda

$$\psi_1^{(p)} = ik_s B e^{ik_s(x\sin\gamma_s + y\cos\gamma_s - c_s t)}, \varphi_1^{(p)} = \chi_1^{(p)} = 0, k_s c_s = \omega.$$

Dekart koordinatalar sistemasida berilgan tushuvchi bo‘ylama to‘lqin potensialini dekart koordinatalar sistemasida ham yozish mumkin

$$\varphi_1^{(p)} = A e^{i(\gamma y - \omega t)} \sum_n \epsilon_n i^n J_n(k_\alpha r) \cos n\theta, \psi_1^{(p)} = \chi_1^{(p)} = 0.$$

Ixtiyoriy integral doimiylari sakkiz noma‘lumli kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalar sistemasi (18) dan aniqlanadi.

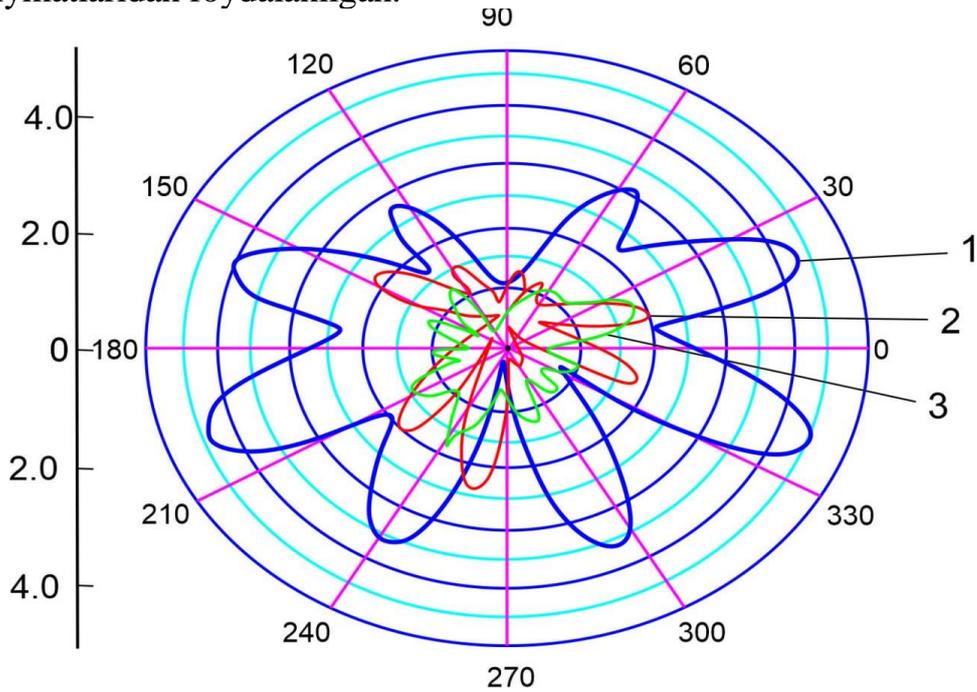


3-rasm. Kontur kuchlanish epyurasi (Q235):

1. $\omega=20$ Hz; 2. $\omega=40$ Hz; 3. $\omega=80$ Hz.

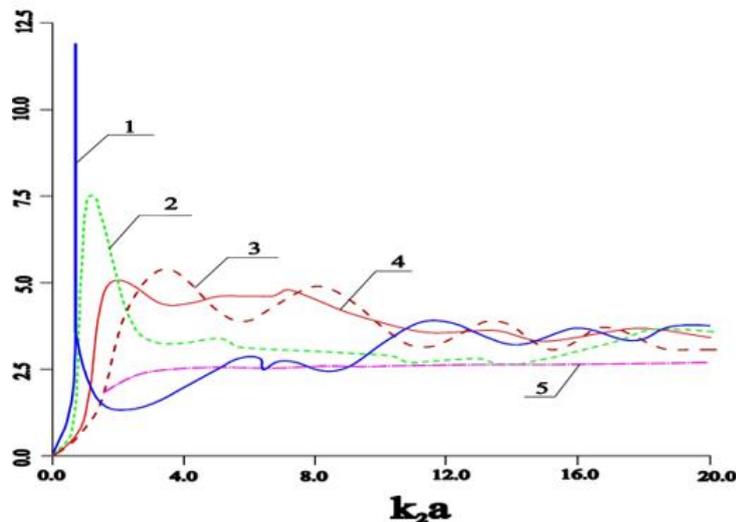
Hisoblashlarda Koltunov–Rjanitsinning uch parametrliligidan foydalanilgan: $R(t) = A e^{-\beta t} / t^{1-\alpha}$, $A=0,048$; $\beta=0,05$; $\alpha=0,1$. Qovushqoq-elastik yarim tekislikda joylashgan aylanasimon ko‘ndalang kesim yuzali tunnelga garmonik to‘lqin ta‘sirida hosil bo‘ladigan kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holati masalasi natijalari, ya‘ni qobiqning turli chastotalardagi kontur kuchlanishlari epyuralari 3 va 4-rasmlarda keltirilgan ($\frac{h}{a}=2,0$). Sonli hisob natijalarini olish uchun, yuqorida

ta'kidlanganidek, po'lat qobiq va Koltunov–Rjanitsinning uch parametrlilik relaksatsiya yadrosi qiymatlaridan foydalanilgan.



4-rasm. Kontur kuchlanish epyurasi (X70):
 1. $\omega=20$ Hz; 2. $\omega=40$ Hz; 3. $\omega=80$ Hz.

Qobiqdagi maksimal kontur kuchlanishlari $\omega \in [19 \div 30]$ Hz chastota qiymatlariga to'g'ri keladi. Epyuralardan ko'rinadiki, to'liq soni βa oshib borishi kuchlanishlarning maksimal qiymatini kamaytirishga imkon beradi. Materiallarning qovushqoqlik xossalarini hisobga olish ko'chish va kuchlanishlarni 10 – 15 % kamaytirishga sabab bo'ladi. Kuchlanishlarning taqsimlanishi esa uzun to'liqlar sohasida ($\frac{D}{\lambda} > 1$) 15 % gacha ko'p bo'lishi ma'lum bo'ldi. Xuddi shunday, ko'ndalang to'liq ta'sirida kuchlanishlar o'zining maksimal qiymatlariga $\theta = 45^\circ$ va 135° burchaklarda erishadi.



5-rasm. Turli burchaklarda kontur kuchlanishining chastotaga bog'liq o'zgarishi

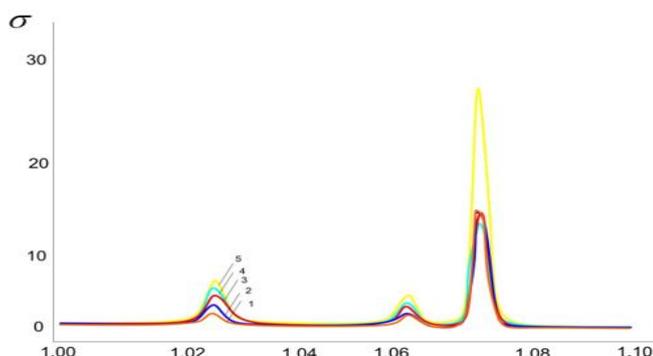
Kontur kuchlanishining ($r=a$) to'liq soniga bog'liq o'zgarishi 5-rasmda keltirilgan

bo‘lib, bunda: 1 chiziq bilan $\theta = 170^\circ$; 2 chiziq bilan $\theta = 110^\circ$; 3 chiziq bilan $\theta = 65^\circ$; 4 chiziq bilan $\theta = 50^\circ$ va 5 chiziq bilan statik holat keltirilgan. Grafiklardan ko‘rinadiki, kontur kuchlanishi o‘zining eng katta qiymatiga kichik chastotalarda erishadi. Mazkur holatda rezonans hodisasi ro‘y berishi mumkin ekanligini ko‘rishimiz mumkin. Ikki xil materiallar Q235 va X70 uchun kontur kuchlanishlarning o‘zgarishi sonli tekshirildi. Sonli natijalar bo‘ylama tushuvchi to‘lqinlar uchun olingan va 6 va 7-rasmlarda keltirilgan.

1-jadval. Ikki xil materiallar Q235 va X70 uchun kontur kuchlanishlarning o‘zgarishi.

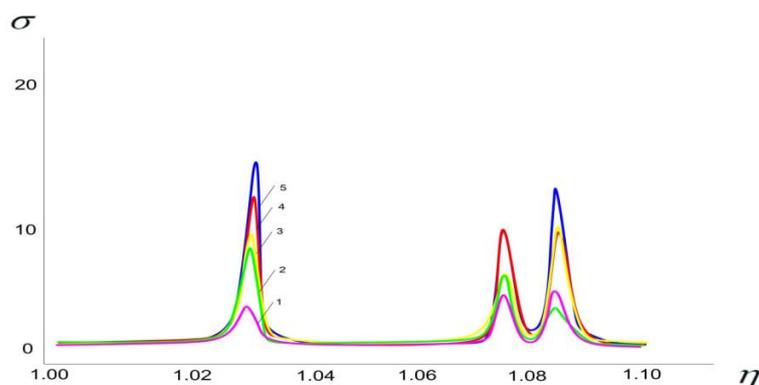
Materiallar	Δ	η	ν	γ_α
Q235	0.99	1.05	2.0	30
X70	0-3.0	1.02-1.10	1.0-5.0	0-90

1- Jadvalda: ν – ko‘milish chuqurligi h - ning ichki radius uzunligiga nisbati, $\eta = \frac{b}{a}$ – radiuslar nisbati, $\delta = \frac{\omega b}{c_{p1}}$ – o‘lchamsiz chastota. Epyuralarni qurish uchun quyidagi parammetrlar olindi: $\eta = 1.05; \nu = 2.0; \theta_\alpha = 30^\circ$. Ushbu bobda sayoz ko‘milgan quvur liniyasining ta’sir omillarini o‘rganish uchun to‘lqin funksiyasining xos formalar bo‘yicha yoyish usulidan foydalanilgan.



6-rasm. Kontur kuchlanishning radiuslar nisbatiga bog‘liq o‘zgarishi (Q235)

1. $\theta = 0^\circ, \theta_\alpha = 45^\circ$; 2. $\theta = 60^\circ, \theta_\alpha = 45^\circ$; 3. $\theta = 60^\circ, \theta_\alpha = 60^\circ$;
4. $\theta = 60^\circ, \theta_\alpha = 90^\circ$; 5. $\theta = 60^\circ, \theta_\alpha = 0^\circ$;



7-rasm. Kontur kuchlanishning radiuslar nisbatiga bog‘liq o‘zgarishi (X70)

1. $\theta = 0^\circ, \theta_\alpha = 45^\circ$; 2. $\theta = 60^\circ, \theta_\alpha = 45^\circ$; 3. $\theta = 60^\circ, \theta_\alpha = 60^\circ$;
4. $\theta = 60^\circ, \theta_\alpha = 90^\circ$; 5. $\theta = 60^\circ, \theta_\alpha = 0^\circ$;

Sonli natijalar shuni ko‘rsatadiki, tushayotgan to‘lqinlar soni, diametrining

qalinligiga nisbati va ko‘milish chuqurligi quvurning seysmik to‘lqinga ko‘rsatadigan reaksiyasiga bevosita ta‘sir qiladi. Tushadigan to‘lqinlari sonining ortishi oraliklarda ko‘rsatiladigan reaksiya eksponensial ravishda kamayar ekan. Muayyan qalinliklar oralig‘ida quvur reaksiyasi (yoki kuchlanishlar konsentratsiyasi) uchta yeng yuqori qiymatga ega bo‘lar ekan.

Agar $r=b$: $\sigma_{rr1} = \sigma_{rr2}$; $\sigma_{r\theta1} = \sigma_{r\theta2}$; $\sigma_{rr1} = k_r(u_{r1} - u_{r2})$, $\sigma_{r\theta1} = k_\theta(u_{\theta1} - u_{\theta2})$

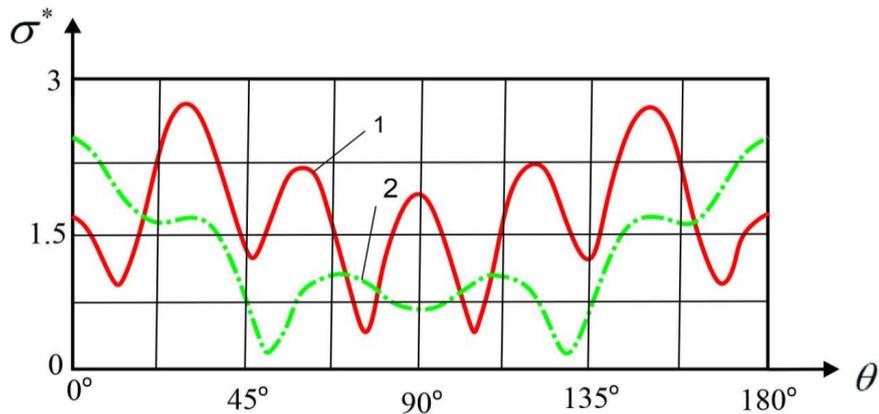
va kontakt shartining oxirgi ikkitasini quyidagi ko‘rinishda yozsak,

$$u_{r1} - \frac{1}{k_r} \sigma_{rr1} = u_{r2}, u_{\theta1} - \frac{1}{k_\theta} \sigma_{r\theta1} = u_{\theta2} \quad (25)$$

U holda $k_r = k_\theta \rightarrow \infty$ bo‘lsa, qobiq va muhit chegarasida qattiq mahkamlanganlik sharti kelib chiqadi. Agar $k_r = k_\theta = 0$ bo‘lsa, u holda qovushqoq-elastik muhitdagi bo‘shliqni olamiz. Sonli natijalar 8-rasmda keltirilgan, uni olishda quyidagi berilgan kattaliklardan foydalanildi:

$$\nu_1 = 0.20, \nu_2 = 0.25, \mu_{12}^* = \mu_1 / \mu_2 = 2.40, C_{p12}^* = c_{p1} / c_{p2} = 1.8,$$

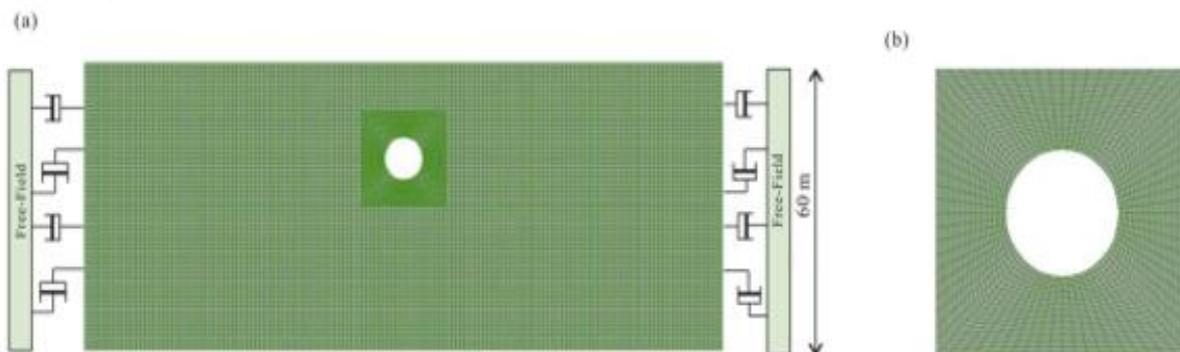
$$a = 1, b = 1.25, \bar{\alpha}_1 a = 0.1, k_r = k_\theta = k\mu_1 / b, k = 10.$$



8-rasm. Kuchlanishlar konsentratsiyasining burchak bo‘yicha o‘zgarishi.

1-tutash chiziq $k=0.11$; 2-yuliy chiziq $k=0.12$ $\alpha_1 a = 1.15$

Muhit bilan kontaktda bo‘lgan silindrik qobiqning seysmik to‘lqin ta‘sirida kuchlanish- deformatsiya holatini topish metodikasi, algoritmi va dasturi ishlab chiqildi. Kontaktda silindrik qobiqning gruntga ko‘rsatadigan reaksiyasining sezilarli bo‘lishi topildi.



9-rasm. Hisob sxemasi

Dissertatsiyaning “Sirt (Reley) to‘lqinining yarim tekislikdagi

silindrik qobiqqa ta'siri xususiyatlari" deb nomlangan uchinchi bobida qovushqoq-elastik yarim tekislikda joylashgan qobiqqa sirt to'liqini ta'siri o'rganilgan (9-rasm).

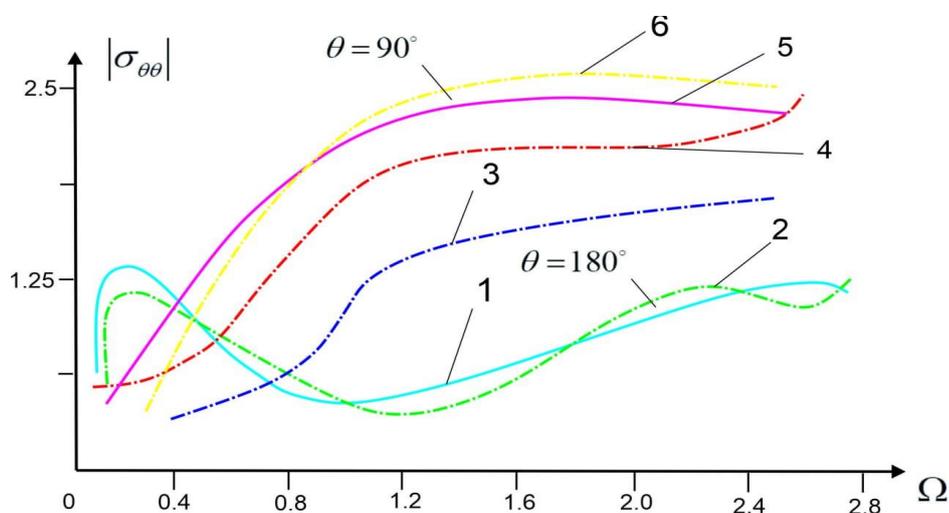
Tekis deformatsiya holati uchun Reley to'liqinini ifodalovchi potentsiallar orqali ifodalangan to'liqin tenglamalari quyidagicha bo'ladi (9-rasm):

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}; \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}; \quad (26)$$

Qo'yilgan masalani yechishda analitik va sonli (chekli elementlar usuli) qo'llandi. Tenglamalar sistemasining yechimi quyidagi maxsus funksiyalar orqali ifodalanadi:

$$\begin{aligned} \phi_1(r) &= A_{1m} Z_m(\alpha_1 r) + A_{2m} W_m(\alpha_1 r); \quad \Psi_{z_1}(r) = A_{3m} Z_m(\beta_1 r) + A_{4m} W_m(\beta_1 r); \\ \Psi_{r_1}(r) - \Psi_{\theta_1}(r) &= 2A_{5m} Z_{m+1}(\beta_1 r) + 2A_{6m} W_{m+1}(\beta_1 r); \\ \Psi_{r_1}(r) + \Psi_{\theta_1}(r) &= 2A_{13m} Z_{m-1}(\beta_1 r) + 2A_{14m} W_{m-1}(\beta_1 r); \\ \phi_2(r) &= A_{7m} Z_m(\alpha_1 r) + A_{8m} W_m(\alpha_1 r); \quad \Psi_{z_2}(r) = A_{9m} Z_m(\beta_1 r) + A_{10m} W_m(\beta_1 r); \\ \Psi_{r_2}(r) - \Psi_{\theta_2}(r) &= 2A_{11m} Z_{m+1}(\beta_1 r) + 2A_{12m} W_{m+1}(\beta_1 r); \\ \Psi_{r_2}(r) + \Psi_{\theta_2}(r) &= 2A_{15m} Z_m(\beta_1 r) + 2A_{16m} W_{m+1}(\beta_1 r), \end{aligned} \quad (27)$$

Analitik va chekli elementlar usuli qo'llansa, masalalar kompleks koeffitsiyentli algebraik tenglamalar sistemasiga kelar ekan. Sonli natijalar 10-rasmda keltirilgan.



10-rasm. Kontur kuchlanishining chastotaga bog'liq o'zgarishi ($\frac{H}{a} = 2.0$):

1.N=544; 2.N=278; 3.N=145; 4.N=278; 5.N=450; 6.N=545.

Bu rasmda kontur kuchlanishining chastotaga bog'liq o'zgarishi keltirilgan. Rasmda θ burchakning 90° va 180° dagi natijalari tanlab olinib, solishtirilgan. Ko'rinib turibdiki, solishtirishlar farqi 15 % gacha boradi. Elementlarning soni oshirib borilsa, bu farq kamayar ekan. Bu rasmlarda turlicha ko'milish chuqurligiga mos kontur kuchlanishi (qobiqdagisi) o'rganildi. Rasmdan ko'rinib turibdiki, kontur kuchlanishi chuqurlik oshishi bilan kamayib borar ekan. Xuddi shunday qobiqqa tushadigan radial bosim va qobiq chuqurlikning turli qiymatlari uchun o'rganildi. Reley (R) to'liqinning ta'siri natijasida silindrik qobiqdagi o'q bo'yicha, siljish va egilish kuchlanishi $0.135 \leq \frac{h}{\lambda} \leq 0.163$ oralig'ida o'zining eng katta qiymatiga erishishi ham sonli tekshirishlar asosida topildi. Reley to'liqinning sirtiga ta'siri natijasida,

silindrik qobiqdagi o‘q bo‘yicha, siljish va egilish kuchlanishi oralig‘ida o‘zining eng katta qiymatiga erishar ekan. Tunnel radiusi tunnelning ko‘milish chuqurligiga qaraganda seysmik kuchlanish o‘shiga kuchliroq ta’sir ko‘rsatar ekan. Kattaroq tunnel radiusi o‘q bo‘yicha kuchlanishning yuqori o‘shiga va seysmik siljish va egilish kuchlanishining pasayishiga olib kelishi topildi.

UMUMIY XULOSALAR

1. Yer osti inshootlarining seysmik kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini baholashda, inshootning ko‘milish chuqurligini hamda erkin sirtidan qaytuvchi to‘lqinlar ta’sirini hisobga olib, analitik va sonli natijalar to‘liq o‘rganilmagan. Erkin sirtidan qaytgan to‘lqinlarning inshoot tuzilmasiga ta’sirini e’tiborga olish, kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini baholashda muhim o‘rin tutadi. Zamonaviy dasturiy ta’minotdan foydalanish (Matlab, ABAKUS) qo‘yilgan muammolarni yechishga imkon beradi.

2. Silindrik qobiq va uni o‘rab turuvchi muhitning harakat tenglamasi to‘lqin tushishi jarayonida qovushqoq-elastiklik nazariyasining chiziqli integro-differensial tenglamalari orqali ifodalandi. Qobiq va muhit kontaktida massasiz qatlam bor deb qaralib, cheksizlikda Zommerfeldning to‘lqin yutilishi sharti qo‘yilib, dinamik kuchlanganlik - deformatsiya holati o‘rganildi.

3. Materiallarning Qovushqoqlik xossalari Bolsman – Volterning integral munosabatidan foydalanib olindi. Relaksatsiya yadrosi sifatida Rjanitsin-Koltunovning kuchsiz singulyar uch parametrli yadrosidan foydalanildi. Garmonik to‘lqin yuklanishi (va difraksiyasi) masalalarini yechishda ko‘chishlar orqali ifodalangan Lamé tenglamasidan foydalanib, ko‘chish potentsiallari orqali ifodalangan xususiy hosilali integro-differensial tenglamalar sistemasi olindi va analitik yechimni Gauss, Laplas va maxsus funksiyalar usullari asosida olish metodikasi va algoritmi ishlab chiqilgan.

4. Sayoz ko‘milgan qobiq liniyasining ta’sir omillarini o‘rganish uchun to‘lqin funksiyasining xos formalar bo‘yicha yoyish usulidan foydalanilgan. Sonli natijalar shuni ko‘rsatadiki, tushayotgan to‘lqinlar soni, diametrining qalinligiga nisbati va ko‘milish chuqurligi quvurning seysmik to‘lqinga ko‘rsatadigan reaksiyasiga bevosita ta’sir qiladi. Tushadigan to‘lqinlar sonining ortishi oraliqlarga ko‘rsatiladigan reaksiya eksponensial ravishda kamayar ekan. Muayyan qalinliklar oralig‘ida quvur reaksiyasi (yoki kuchlanishlar konsentratsiyasi) uchtagacha eng yuqori qiymatlarga ega bo‘lar ekan.

5. Muhit bilan massasiz elimentlar orqali kontaktda bo‘lgan silindrik qobiqning seysmik to‘lqin ta’sirida kuchlanish-deformatsiya holatini topish metodikasi, algoritmi va dasturi ishlab chiqildi. Massasiz elimentlar orqali kontaktda silindrik qobiqning gruntga ko‘rsatadigan reaksiyasining sezilarli bo‘lishi topildi.

6. Reley to‘lqinning yer sirtiga ta’siri natijasida, silindrik qobiqdagi o‘q bo‘yicha, siljish va egilish kuchlanishi $0.135 \leq \frac{h}{\lambda} \leq 0.163$ oralig‘ida o‘zining eng katta qiymatiga erishar ekan. Tunnel radiusi tunnelning ko‘milish chuqurligiga qaraganda seysmik kuchlanish o‘shiga kuchliroq ta’sir ko‘rsatar ekan. Kattaroq tunnel radiusi o‘q bo‘yicha kuchlanishning yuqori o‘shiga va seysmik siljish va egilish kuchlanishining pasayishiga olib kelishi topildi.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ СОСТАВЛЕННЫЙ НА ОСНОВЕ
НАУЧНОГО СОВЕТА PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ БУХАРСКОМ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

БУХАРСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ХОДЖИЕВ АЗИЗЖАН ХОЛМУРОДОВИЧ

**НАГРУЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ
ОБОЛОЧКЕ НАХОДЯЩЕЙСЯ В ВЯЗКОУПРУГОЙ
ПОЛУПЛОСКОСТИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (Doctor of Philosophy) по техническим наукам

Бухара- 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована за номером B2025.1.PhD/T5207 в Высшей Аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан

Диссертация выполнена в Бухарском инженерно -технологическом институте.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на сайте института (www.bmti.uz) и на информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz) размещается.

Научный руководитель:

Болтаев Зафар Ихтиёрович

доктор физико-математических наук (DSc),
профессор

Официальные оппоненты:

Мавланов Тулкин Мавланович

доктор технических наук, профессор

Усмонов Ботир Шукуриллаевич

доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

Наманганский государственный технический университет

Защита диссертации состоится 23 мая 2025 г. в 10⁰⁰ часов на заседании разового Научного совета составленный на основе Научного совета PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 при Бухарском инженерно-технологическом институте. (Адрес: 100118, г.Бухара, ул.Каюма Муртазаева 15. Тел.: (+99865) 223-78-84; факс: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарского инженерно-технологического института (зарегистрирована за № 358). (Адрес: 100118, г.Бухара, ул.Каюма Муртазаева 15. Тел.: (+99865) 223-78-84).

Автореферат диссертации разослан 8 мая 2025 года.

(протокол рассылки № 1 от 10 апреля 2025 г.)



М.Х.Тешаев

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

Ш.Р. Ахмедов

Ученый секретарь разового Научного совета по присуждению ученых степеней, кандидат технических наук, доцент.

Б.С. Рахмонов

Председатель разового Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, доктор технических наук, (DSc)

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире для проектирования и строительства сейсмостойких зданий и сооружений в сейсмоактивных районах, предотвращения повреждений или разрушений, изучения взаимодействия деформируемых конструктивных элементов неглубоко расположенных подземных сооружений с окружающей средой, а также разработка и применение методов расчета занимают одно из ведущих мест. В мировом масштабе под воздействием сейсмических и сейсмо-взрывных волн требуется внедрение в практику конструкций, обеспечивающих высокую сейсмостойкость и экономичность подземных сооружений (тоннелей, метрополитенов, подземных пешеходных переходов, систем инженерных коммуникаций: водопроводов, канализационных трубопроводов, нефте-и газопроводов и др.). В связи с этим, при исследовании влияния сейсмических волн, возникающих в результате разрушений подземных трубопроводов и коллекторов, землетрясений и сильных взрывов на подземные оболочечные сооружения в сейсмических районах, а также прочности оболочек, важно использовать математические модели и современные методы расчета для определения динамического напряженно-деформированного состояния с учетом вязкоупругих свойств материалов. В мире одной из важных задач является развитие теории изучения научных основ проблемы воздействия сейсмических волн на многослойные композитные цилиндрические оболочки с заполнителями, совершенствование научной базы, проведение целевых научных исследований в этих направлениях для разработки методов расчета.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на изучение научных основ проблемы воздействия сейсмических волн на многослойные композитные цилиндрические оболочки с наполнителями. В связи с этим особое внимание уделяется проведению целевых научных исследований в этих областях, развитию теории, совершенствованию научной базы и разработке методов расчета.

В нашей республике в области строительства и техники осуществляются широкомасштабные мероприятия по внедрению на практике подземных композитных оболочек, находящихся под воздействием различных динамических нагрузок, и достигаются определенные результаты. В Постановлении Президента Республики Узбекистан от 16 мая 2023 года № ПП-158 “О дополнительных мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан”⁴ и от 17 апреля 2024 года № ПП-161 “О мерах по повышению сейсмостойкости зданий и сооружений и совершенствованию деятельности по мониторингу сейсмической опасности”⁵ определены важные задачи. При реализации этих задач, в том числе, важное значение приобретает разработка и развитие усовершенствованных математических моделей, эффективных методов расчета для обеспечения прочности и конкурентоспособности подземных строительных конструкций.

Постановление Президента Республики Узбекистан № PQ-4794 от 30 июля

⁴Постановление Президента Республики Узбекистан от 16 мая 2023 года № ПП-158 "О дополнительных мерах по дальнейшему совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан."

⁵Постановление Президента Республики Узбекистан от 17 апреля 2024 года № ПП-161 "О мерах по повышению сейсмостойкости зданий и сооружений и совершенствованию деятельности по мониторингу сейсмической опасности"

2020 года “О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан”⁶, Постановления Президента Республики Узбекистан № PQ-4708 от 7 мая 2020 года “О мерах по повышению качества образования в области математики и развитию научных исследований” и сопутствующей деятельности. Данная диссертация служит в определенной степени реализации задачи, определенные в других нормативных и правовых документах.

Соответствие исследования приоритетному направлению развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данная диссертация является частью IV развития науки и техники Республики Узбекистан. Оно проводилось в соответствии с приоритетным направлением «Математика, механика и информатика».

Уровень изученности проблемы. Вопросы нагружения поверхностными и объемными волнами на цилиндрическую оболочку в вязкоупругой полуплоскости с научной точки зрения исследовали известные зарубежные ученые: Ильюшин А.А., Горшков А.Г., Вольмир А.С., Шемякин Е.И., Гузь А.Н., Трояновский И.Е., Кийко И.А., Молотков Л.А., Новичков Ю.И., Крауклис П.В., Слепян Л.И., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Старовойтов Е.И., Анофрикова Н.С. и другие.

В решении этой проблемы узбекские ученые Уразбаев М.Т., Ширинкулов Т.Ш., Рахматулин Х.А., Кабулов В.К., Рашидов Т.Р., Мубораков Я.Н., Мардонов Б.М., Султанов К.С., Маматкулов Ш.М., Мирсаидов М.М., Бадалов Ф.Б., Хойметов Г.Х., Ишанходжаев А.А., Мавлонов Т.М., Мирзаев И.К., Абдусатторов А.А., Сафаров И.И., Худайназаров ХХ, Хусанов Б.Е., Рахмонов Б.С., Тешаев М.Х., Юлдашев Ш.С., Абдукодиров С.А., Усаров М.К. и другие вносят свой вклад с учетом реологических свойств материала, сейсмо-взрывных работ подземных сооружений различной формы (стержневых, цилиндрических и сферических тел).) разработал и развивает методы исследования воздействия волн и алгоритмы расчета. Несмотря на вышеизложенное, существует ряд проблем, не решенных на данный момент. При глубинных работах предполагается заглубление сооружений с учетом поверхности земли и поверхностных волн. Поскольку исследование динамических процессов в диссипативно-неоднородных волноводах обогащает динамику деформируемых твердых тел теоретически, его новые результаты, связанные с диссипацией энергии, имеют важное практическое значение.

Связь темы диссертации с научными планами вуза, в котором выполнена диссертация. Диссертация выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Бухарского инженерно-технологического института ФМ-01-2020-2024 в рамках проекта “Математическое моделирование механических процессов в вязкоупругих телах”.

Целью исследования является математическая постановка задачи нагружения поверхностных волн на цилиндрическую оболочку, расположенную в вязкоупругом полупространстве, разработка методов и алгоритмов решения, а также анализ численных результатов.

Задачи исследования:

разработка математической постановки, методики и алгоритма решения задачи нахождения динамического напряженно-деформированного состояния, вызванного продольными, поперечными и поверхностными (рэлеевскими)

⁶ Указ Президента Республики Узбекистан № PQ-4794 «О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан» от 30.07.2020.

волнами на цилиндрическую оболочку, расположенной в вязкоупругом полупространстве;

дать сравнительную оценку динамического напряженно-деформированного состояния оболочки и окружающей ее среды в результате продольного и поперечного волнового нагружения вязкоупругой цилиндрической оболочки;

исследование динамического напряженно-деформированного состояния, создаваемого поверхностной (рэлеевской) волной в вязкоупругой полуплоской цилиндрической оболочке методом конечных элементов;

сравнение поверхностной волны (рэлеевской) с накоплением напряжений на поверхности неармированной цилиндрической полости.

Объект исследования является цилиндрическая оболочка.

Предметом исследования являются вопросы оценки в целом затухания продольной или поперечной, а также поверхностных волн на протяженную вязкоупругую цилиндрическую оболочку в зависимости от геометрических и физико-механических параметров.

Методы исследования. В процессе исследования для решения интегро-дифференциальных уравнений в частных производных механики деформируемого твердого тела теории упругости были использованы специальные функции математической физики, интегральные преобразования Фурье, методы Мюллера, Гаусса.

Научная новизна исследования состоит из:

математически поставлена задача нахождения динамического напряженно-деформированного состояния, создаваемого воздействием продольных, поперечных и поверхностных (Рэлеевских) волн на цилиндрическую оболочку, находящуюся в вязкоупругом полупространстве, разработаны аналитический и численный метод и алгоритм ее решения;

установлено, что влияние глубины погружения на напряженно-деформированное состояние вязкоупругой цилиндрической оболочки в результате нагружения поверхностной волной зависит от длины падающей волны и с увеличением глубины экспоненциально уменьшаются перемещения;

установлено, что динамические напряжения, возникающие в результате распространения волны под действием гармонической периодической силы в цилиндрической оболочке вязкоупругой полуплоскости, зависят от глубины погружения деформационного состояния, частоты вынужденной силы и амплитуды гармонической силы;

установлено, что напряженно-деформированное состояние цилиндрической оболочки в области длинных волн на 20% превышает напряженность статического состояния.

Практические результаты исследования состоит из:

разработаны методы расчета прочности цилиндрических тел для напряженного и деформированного состояния, вызванного сейсмической волновой нагрузкой на многослойные композитные цилиндрические оболочки с жидкостью;

решена задача нахождения конечного числа мод комплексных частот в спектральной задаче сейсмического нагружения на многослойную композитную цилиндрическую оболочку с жидкостью;

определено распределение напряжений в цилиндрическом пространстве, защищенном цилиндрической оболочкой и деформируемой средой под воздействием сейсмических и продольных или поперечных волновых нагрузок на

многослойные композитные цилиндрические оболочки с жидкостью.

Достоверность результатов исследования обосновывается корректной постановкой краевых и спектральных задач, систематическим использованием методов решения на основе строгости выведенных математических соотношений и сравнением с решениями других ученых.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они вносят существенный вклад в развитие теории волнового нагружения и дифракции трубопроводов, расположенных в упругой среде.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности изучения новых закономерностей напряженно-деформированного состояния трубопроводов с точными параметрами, расположенных в упругой среде, возникающих в результате волнового нагружения, а также в решении задачи нахождения конечного числа мод комплексных частот в краевой и спектральной задачах.

Внедрение результатов исследований. На основе полученных результатов по методам и алгоритму расчета нагруженного состояния поверхностных волн в цилиндрической оболочке в вязкоупругой полуплоскости:

от метода разработанный в диссертации разложения волновой функции по собственным формам был использован в фундаментальном проекте Ф-4-14, выполненном в Бухарском инженерно-технологическом институте в 2012-2016 гг. на тему "Развитие и расчет теории исследования напряженно-деформированного состояния подземного криволинейного трубопровода с течением жидкости под действием внешних сил" (справка Бухарского инженерно-технологического института No 1-1-01/04-70 от 6 января 2025 г.). В результате удалось определить формы факторов воздействия многослойной композитной неглубоко заглубленных трубопроводов, по которой течет вязкая жидкость;

от методика решения однородных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка была использована в фундаментальном проекте ОТ-Ф4-01 "Разработка методов и развитие теории изучения нелинейного динамического напряженно-деформированного состояния криволинейных участков многослойных композитных труб, по которым течет вязкая жидкость, под воздействием температуры и динамических нагрузок," выполненном в Ташкентском химико-технологическом институте в 2016-2020 годах (справка Ташкентского химико-технологического института No 1/01-2247 от 27 августа 2024 года). В результате определены дисперсионные соотношения, характеризующие напряженно-деформированное состояние и затухание при нагружении объемной волной на вязкоупругую цилиндрическую оболочку;

в результате воздействия волны R на поверхности земли, эффективность достижения наибольшего значения в диапазоне осевого смещения и изгибающего напряжения в цилиндрической оболочке, а также методы обеспечения сейсмостойкости соединительных инженерных трубопроводов сооружений, определенные в диссертации, были использованы в ООО "Узжамоалойиха" и "Курилишлойиха" (Справка No 25/1-1114 от 10 декабря 2024 года Департамента по координации вопросов обеспечения сейсмической безопасности Кабинета Министров Республики Узбекистан). В результате уровень предварительного выявления областей, где может произойти резонанс, увеличился до 20%, а за счет выбора реологических параметров материалов стало возможным увеличить легкость, экономичность и долговечность конструкций до 30%.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 6 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций доктора философии (PhD), из них 3 в республиканских и 3 в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 107 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

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

В первой главе диссертации, озаглавленной **"Анализ литературы, посвященной изучению напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки в деформируемой полуплоскости, вызванного нагрузкой сейсмическими (поверхностными и объемными) волнами,"** представлен краткий анализ литературы, посвященной изучению напряженно-деформированного состояния неглубоко расположенных цилиндрических труб (разного поперечного сечения) под действием объемных и поверхностных волн, а также сделаны выводы на основе анализа литературы. Эта глава состоит из трех параграфов. Первый параграф озаглавлен **"Анализ литературы, посвященной изучению волнового нагружения и дифракции цилиндрических оболочек, расположенных в деформируемой полуплоскости."** В нем представлен краткий обзор литературы, посвященной изучению сейсмостойкости цилиндрических оболочек, расположенных в грунтовой среде в сейсмической зоне, сооружений трубопроводов, тоннелей метро, газохранилищ и других подземных сооружений.

Второй параграф этой главы называется **"Анализ литературы, посвященной определению частоты собственных колебаний и коэффициента затухания трубопроводов с точными параметрами, расположенных в упругой среде"**. В данном параграфе приведен анализ литературы, посвященной разработке конструктивных решений при проектировании трубопроводов в сейсмических районах, обеспечивающих их устойчивость к сейсмическим нагрузкам, безопасности и экономичности, а также совместимым с решениями, применяемыми при борьбе с другими природными и техногенными опасностями.

Третий параграф называется **"Анализ современных сейсмических нормативных правил (СНП) по сейсмостойкому строительству."** В ней проанализирована литература, посвященная расчету тонкостенных тоннелей под воздействием сейсмических нагрузок. Показана необходимость учета пространственного состояния при их расчете и совершенствования методов расчета.

Во второй главе диссертации, названной **"Постановка, методика и алгоритм решения задачи нагружения (поверхностных и объемных) сейсмических волн на цилиндрическую оболочку в вязкоупругой"**

полуплоскости" приведены математическая постановка, методика и алгоритм решения задачи нахождения и анализа динамического напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки, находящейся в вязкоупругой полуплоскости под действием сейсмической волны. Используются дифференциальные уравнения движения оболочки, где справедлива гипотеза Кирхгофа-Лява для тонких цилиндрических оболочек, уравнения вязкоупругой теории механики деформируемых тел для толстых цилиндров. Тогда уравнения движения механической системы, состоящей из многослойной оболочки (или толстостенного цилиндра), будут следующими:

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

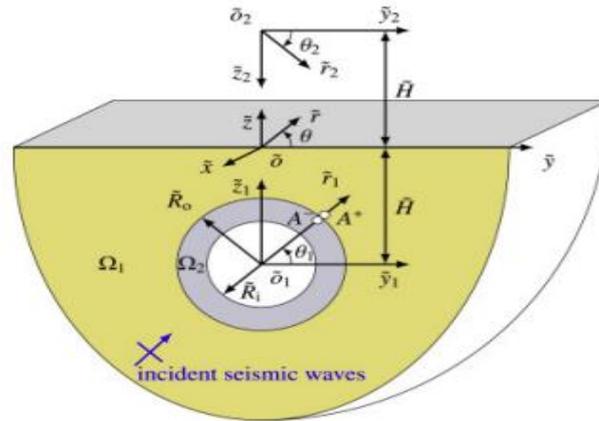


Рис. 1. Схема расчета волнового нагружения цилиндрической оболочки, расположенной в деформируемом полупространстве

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

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

$$\Delta \phi_0 - \frac{1}{c_\infty^2} \ddot{\phi}_0 = 0. \quad (3)$$

Если цилиндрический слой заполнен вязкой жидкостью, то он выражается уравнением (3).

Если цилиндрическая оболочка состоит из слоев, то ее движение будет иметь вид уравнений (1) и (2). Контактные и граничные условия задаются следующим образом:

1. Если цилиндрическое тело состоит из слоев, то уравнения его движения будут иметь вид (1) и (2). Между слоями накладывается условие жесткого контакта

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

2. Если между слоями поместить безмассовый элемент, то граничные (контактные) условия, для случая плоской деформации, будут следующими:

$$r = a_k: \quad \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)}; \\ \sigma_{rrk} = \bar{k}_r (u_{rk} - u_{r(k+1)}); \\ \sigma_{r\theta k} = \bar{k}_\theta (u_{\theta k} - u_{\theta(k+1)}). \quad (5)$$

3. Если при $r=a_l$ первый слой без жидкости или заполнителя, то ставится условие освобождения от напряжений:

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

4. Если радиальная координата стремится к бесконечности, то продольный и поперечный волновые потенциалы удовлетворяют условиям поглощения Зоммерфельда

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

Предположим, что конструкция контактирует со средой с безмассовыми деформируемыми элементами (безинерционный элемент). Это еще называют основой Винклера. Она для цилиндрической трубы в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\begin{aligned} q_{1r}^k &= -\tilde{k}_r^k w^k; \quad q_{1\theta}^k = 0, \\ \tilde{k}_r^k [f(t)] &= k_{r0}^k \left[f(t) - \int_0^t R_k(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \end{aligned} \quad (8)$$

k_{r0}^k - коэффициент мгновенной постели, $R_k(t-\tau)$ - ядро релаксации.

Если использовать (8) для основы Винклера с учетом силы инерции, то она определяется следующим образом

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k - m_f \ddot{w}^k, \quad (9)$$

где m_f - эффективная масса основания.

Теперь задаем контактные и граничные условия для цилиндрического тела, изображенного на рисунке 1

$$\begin{aligned} \sigma_{\bar{z}\bar{z}}^{(1)} &= \sigma_{\bar{z}y}^{(1)} = \sigma_{\bar{z}x}^{(1)} = 0, \quad \bar{z} = 0, \\ \sigma_{\bar{r}_1\bar{r}_1}^{(2)} &= \sigma_{\bar{r}_1\theta_{11}}^{(2)} = \sigma_{\bar{r}_1\bar{z}_1}^{(2)} = 0, \quad \bar{r}_1 = \tilde{R}_1, \\ u_{\bar{r}_1}^{(1)} &= u_{\bar{r}_1}^{(2)}, u_{\theta_1}^{(1)} = u_{\theta_1}^{(2)}, u_{\bar{z}_1}^{(1)} = u_{\bar{z}_1}^{(2)}, \quad \bar{r}_1 = \tilde{R}_0, \\ \sigma_{\bar{r}_1\bar{r}_1}^{(2)} &= \sigma_{\bar{r}_1\theta_{11}}^{(2)} = \sigma_{\bar{r}_1\bar{z}_1}^{(2)} = 0, \quad \bar{r}_1 = \tilde{R}_1, \\ \sigma_{\bar{r}_1\bar{r}_1}^{(1)} &= \sigma_{\bar{r}_1\bar{r}_1}^{(2)}, \sigma_{\bar{r}_1\theta_1}^{(1)} = \sigma_{\bar{r}_1\theta_1}^{(2)}, \sigma_{\bar{r}_1\bar{z}_1}^{(1)} = \sigma_{\bar{r}_1\bar{z}_1}^{(2)}, \quad \bar{r}_1 = \tilde{R}_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Цилиндрические и плоские волны, распространяющиеся в среде, для случая плоской деформации, будут следующие:

$$1. \varphi^{(p)} = Ae^{i(\alpha x - \omega t)}, \psi^{(p)} = 0; \quad 2. \psi^{(p)} = Ae^{i(\beta x - \omega t)}, \varphi^{(p)} = 0. \quad (11)$$

Если по поверхности грунта распространяется волна Рэлея, то смещение грунта, для изотропной среды, будет:

$$\begin{aligned} U_x &= \frac{1}{2} A \left[2e^{b_1 y} - \left(2 - \frac{V_R^2}{V_s^2} \right) e^{b_2 y} \right] \cos(x - V_R t), \\ U_y &= \frac{1}{4} A \frac{\left(2 - \frac{V_R^2}{V_s^2} \right)}{\sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_s^2}}} \left[\left(2 - \frac{V_R^2}{V_s^2} \right) e^{b_2 y} - 2e^{b_1 y} \right] \sin(x - V_R t), \\ b_1 &= k \sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_p^2}}, \quad b_2 = k \sqrt{1 - \frac{V_R^2}{V_s^2}}, \end{aligned} \quad (12)$$

где U_x и U_y – смещения точек поверхности окружающей среды по координатным осям x и y соответственно; A – амплитуда волны; V_R, V_s и V_p – скорости Рэлея, поперечной и продольной волн соответственно, $k = 2\pi / \lambda, \lambda$ – длина волны, t – время.

Дифференциальное уравнение цилиндрической оболочки и окружающей ее среды выразим через продольный и поперечный волновые потенциалы вектора смещения

$$\vec{u}_j = \text{grad} \phi_j + \text{rot} \vec{\psi}_j, \text{div} \vec{\psi}_j = 0. \quad (13)$$

Основные задачи сводятся к задаче о состоянии плоской деформации теории упругости. Поэтому продольные ϕ_j и поперечные $\vec{\psi}_j(\psi_{zj}, 0, 0)$ волновые потенциалы удовлетворяют следующим интегро-дифференциальным уравнениям

$$\Gamma_{\lambda\mu\kappa} \nabla^2 \phi_k - \frac{1}{c_{p0k}^2} \frac{\partial^2 \phi_k}{\partial t^2} = 0; \quad \Gamma_{\mu\kappa} \nabla^2 \psi_z - \frac{1}{c_{s0k}^2} \frac{\partial^2 \psi_z}{\partial t^2} = 0; \quad (14)$$

Решение уравнений (14) будут

$$\begin{aligned} \phi_j &= \sum_{n=0}^{\infty} [A_{nj} H_n^{(1)}(\alpha_j r) + A'_{nj} H_n^{(2)}(\alpha_j r)] \cos n\theta e^{-i\omega t}; \\ \psi_j &= \sum_{n=0}^{\infty} [B_{nj} H_n^{(1)}(\beta_j r) + B'_{nj} H_n^{(2)}(\beta_j r)] \sin n\theta e^{-i\omega t}; \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \\ \phi_N &= \sum_{n=0}^{\infty} [C_{nN} H_n^{(1)}(\alpha_N r) + D_{nN} H_n^{(2)}(\alpha_N r)] \cos n\theta e^{-i\omega t}, \\ \psi_N &= \sum_{n=0}^{\infty} [M_{nN} H_n^{(1)}(\beta_N r) + L_{nN} H_n^{(2)}(\beta_N r)] \sin n\theta e^{-i\omega t}, \\ \phi_0 &= \sum_{n=0}^{\infty} [K_{n0} J_n(\alpha_0 r) + K'_{n0} N_n(\alpha_0 r)] \cos n\theta e^{-i\omega t}. \end{aligned} \quad (15)$$

где n – целое число; ω – комплексная величина при исследовании задачи свободных колебаний, а при изучении вынужденных колебаний – действительная величина, $A_{nj}, A'_{nj}, B_{nj}, B'_{nj}, C_{nj}, D_{nj}, L_{nN}, M_{nN}, K_{nN}$ и K'_{nN} – произвольные постоянные величины, которые определяются из граничных условий; $H_n^{(1)}(\alpha_j r)$ и $H_n^{(2)}(\alpha_j r)$ – функции Бесселя и Ханкеля, соответственно: $H_n^{(1,2)}(\alpha r) = J_n(\alpha r) \pm iN_n(\alpha r)$.

Связь между цилиндрической и декартовой системами координат следующая

$$\begin{bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_x \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u_r \\ u_\theta \\ u_x \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & \sigma_{r\theta} & \sigma_{rx} \\ \sigma_{\theta r} & \sigma_{\theta\theta} & \sigma_{\theta x} \\ \sigma_{xr} & \sigma_{x\theta} & \sigma_{xx} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \sigma_{yy} & \sigma_{yz} & \sigma_{yx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{zz} & \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xx} \end{bmatrix} T^T. \quad (16)$$

где T – матрица преобразования, T^T – транспонированная матрица.

В первом случае пусть на цилиндрическое тело падает продольная объемная волна. Тогда падающая и отраженная волны будут:

$$\begin{aligned} \phi^{(p)} &= \phi_0 e^{-i(k_x^{(1)} x + k_y^{(1)} y + k_z^{(1)} z)}, \quad \phi^{(s)} = R_{\phi, \phi} \phi_0 e^{-i(k_x^{(1)} x + k_y^{(1)} y - k_{z,p}^{(1)} z)}, \\ \psi^{(s)} &= R_{\psi, \phi} \phi_0 e^{-i(k_x^{(1)} x + k_y^{(1)} y - k_{z,s}^{(1)} z)}, \quad \chi^{(s)} = R_{\chi, \phi} \phi_0 e^{-i(k_x^{(1)} x + k_y^{(1)} y - k_{z,s}^{(1)} z)}, \end{aligned} \quad (17)$$

где (p) представляет собой падающую волну, (s) - отраженную волну.
 $k_x^{(1)} = k_{x,p}^{(1)} = -k_p^{(1)} \sin \theta_v \cos \theta_h, k_y^{(1)} = k_{y,p}^{(1)} = k_p^{(1)} \sin \theta_v \sin \theta_h.$

Волновые числа $k_{z,p}^{(1)}$ и $k_{z,s}^{(1)}$ представляют собой продольные и и сдвиговые волновые числа вдоль оси z соответственно

$$k_{z,p}^{(1)} = \sqrt{(k_p^{(1)})^2 - (k^{(1)})^2}, k_{z,s}^{(1)} = \sqrt{(k_s^{(1)})^2 - (k^{(1)})^2},$$

где $\text{Re}(k_{z,p}^{(1)}) > 0$ и $\text{Re}(k_{z,s}^{(1)}) > 0$. В таком случае принимается: $\omega > 0$. Волновое число $k^{(1)}(x,y)$ на плоскости xy определяется следующим образом:

$$k^{(1)} = \sqrt{(k_x^{(1)})^2 - (k_y^{(1)})^2}. \text{ Согласно закону волновой динамики Снеллы, для}$$

отраженных продольной и поперечной волны в направлении x: $k_{x,p}^{(1)} = k_{x,s}^{(1)} = k_x^{(1)}$.

Волны, отраженные от цилиндрической оболочки, и ее решение, полученное с помощью уравнений Гельмголя, представлены функциями n-го порядка Ханкелевого типа 1 и 2 для поля «s,1».

$$\varphi_{s,1}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n H_n^{(2)}(k_a^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_1 - k_x^{(1)} x)}, \psi_{s,1}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n H_n^{(2)}(k_b^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_1 - k_x^{(1)} x)},$$

$$\chi_{s,1}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}(k_a^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_1 - k_x^{(1)} x)}, \varphi_{s,2}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n H_n^{(2)}(k_a^{(1)} r_2) e^{i(n\theta_2 - k_x^{(1)} x)},$$

$$\varphi_{s,1}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e_n H_n^{(2)}(k_b^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_2 - k_x^{(1)} x)}, \varphi_{s,1}^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n H_n^{(2)}(k_b^{(1)} r_1) e^{i(n\theta_2 - k_x^{(1)} x)},$$

Здесь $a_n, b_n, c_n, d_n, e_n, f_n$ – произвольные константы интегрирования

$$k_a^{(1)} = \sqrt{(k_p^{(1)})^2 - (k_x^{(1)})^2}, k_b^{(1)} = \sqrt{(k_s^{(1)})^2 - (k_x^{(1)})^2}, \text{Re}(k_a^{(1)}) > 0 \text{ и } \text{Re}(k_b^{(1)}) > 0. \text{ Это}$$

состояние рассматривается как распространение затухающей цилиндрической волны $\text{Im}(k_a^{(1)}) < 0$ в грунте.

Если использовать граничные условия (6) – (9) для нахождения произвольных констант, то получим систему неоднородных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами

$$[C_2(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)] \{q\} = \{P_1\}, \quad (18)$$

где $\{q\}$ -вектор – столбец произвольных констант; $\{R\}$ - вектор падающих внешних волн; $[C_1]$ -квадратная матрица, элементы которой состоят из функций Бесселя и Ханкеля. Контурное напряжение $\sigma_{\theta\theta}$

$$\sigma_{\theta\theta}|_{r=0} = (\text{Re} + iJ_m) e^{-i\alpha x} = \sqrt{\text{Re}^2 + J_m^2} e^{-i(\alpha x - \gamma)}, \quad \gamma = \text{arctg} \frac{J_m}{\text{Re}}. \quad (19)$$

Таким образом, во второй главе при решении задач гармонического волнового нагружения (и дифракции) с помощью уравнения Ламе, выраженного через смещения, была получена система интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, выраженных через потенциалы смещений, и разработана методика и алгоритм получения аналитического решения на основе методов Гаусса, Лапласа и специальных функций.

В третьей главе диссертации "**Особенности нагружения объемной сейсмической волной цилиндрической оболочки, находящейся в вязкоупругой полуплоскости**" решается задача о нагружении и дифракции продольной или поперечной объемной волны на оболочку, расположенную в

вязкоупругой полуплоскости. Эта глава состоит из трех параграфов. В первом параграфе представлена постановка и методика решения задачи о нагружении объемной сейсмической волной цилиндрическую оболочку, находящуюся в вязкоупругой полуплоскости. Во втором параграфе представлены численные результаты и их анализ.

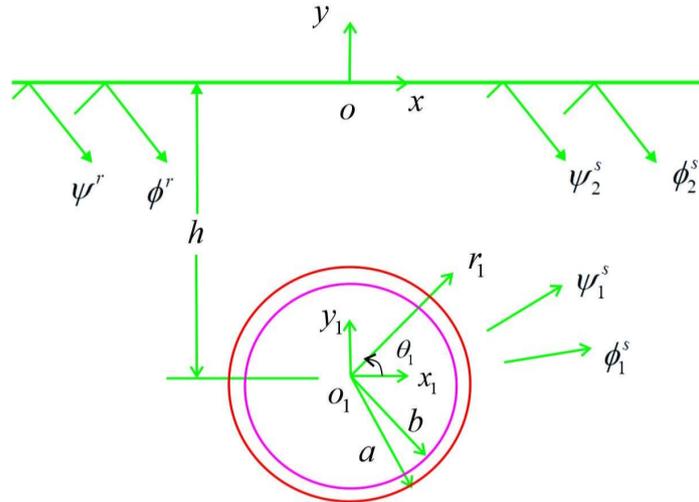


Рис. 2. Схема расчета объемного волнового нагружения цилиндрической оболочки, расположенной в вязко-упругой полуплоскости

Падающие продольные и поперечные волны определяются соотношением волн

$$\varphi^{(f)} = \varphi^{(p)} + \varphi^{(r)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n J_n(k_{\alpha 1} r_1) e^{in\theta_1}, \psi^{(r)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n J_n(k_{\beta 1} r_1) e^{in\theta_1}. \quad (20)$$

Здесь a_n и b_n ($n=0,1,2,\dots$) — произвольные константы. Формулой (20) выражено отражение падающей продольной гармонической волны от свободного уровня полуплоскости. Волны, отражённые от цилиндрической оболочки, выражаются следующим образом:

$$\varphi_1^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(k_{\alpha 1} r_1) e^{in\theta_1}, \psi_1^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(k_{\beta 1} r_1) e^{in\theta_1}, \quad (21)$$

Здесь A_n и B_n - произвольные константы интегрирования. Решение (21) удовлетворяет условию поглощения Зоммерфельда на бесконечности; k_{α} и k_{β} продольное и поперечное волновые числа соответственно. Для вязкоупругой среды $k_{\alpha k} = \omega / c_{\alpha k} \Gamma_{\alpha k}$, $k_{\beta k} = \omega / c_{\beta k} \Gamma_{\beta k}$ являются комплексными величинами. Волна, отраженная от цилиндрической оболочки, принимается как

$$\varphi_2^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{2n} J_n(k_{\alpha 1} r_1) e^{in\theta_1}, \psi_2^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_{2n} J_n(k_{\beta 1} r_1) e^{in\theta_1} \quad (22)$$

Потенциалы падающей и отраженной продольной и поперечной волн следующие:

$$\begin{aligned} \varphi^0 &= \varphi^{(f)} + \varphi_1^{(s)} + \varphi_2^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [(a_n + A_{2n}) J_n(k_{\alpha 1} r_1) + A_{1n} H_n^{(1)}(k_{\alpha 1} r_1)] e^{in\theta_1}, \\ \psi^0 &= \psi^{(f)} + \psi_1^{(s)} + \psi_2^{(s)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [(b_n + B_{2n}) J_n(k_{\beta 1} r_1) + B_{1n} H_n^{(1)}(k_{\beta 1} r_1)] e^{in\theta_1}, \end{aligned} \quad (23)$$

здесь $A_{1n}, A_{2n}, B_{1n}, B_{2n}$ - произвольные константы интегрирования. Видно, что мы учли влияние всех падающих и отраженных волн через волновые потенциалы. Решение волнового уравнения для цилиндрической оболочки выглядит следующим образом.

$$\varphi^c = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [C_{1n} H_n^{(1)}(k_{\alpha 2} r_1) + C_{2n} H_n^{(2)}(k_{\alpha 2} r_1)] e^{in\theta_1},$$

$$\psi^c = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [D_{1n} H_n^{(1)}(k_{\beta 2} r_1) + D_{2n} H_n^{(2)}(k_{\beta 2} r_1)] e^{in\theta_1},$$
(24)

здесь $C_{1n}, C_{2n}, D_{1n}, D_{2n}$ - произвольные константы интегрирования. Если на цилиндрическую оболочку падает поперечная волна, то

$$\psi_1^{(p)} = ik_s B e^{ik_s(x \sin \gamma_s + y \cos \gamma_s - c_s t)}, \varphi_1^{(p)} = \chi_1^{(p)} = 0, k_s c_s = \omega.$$

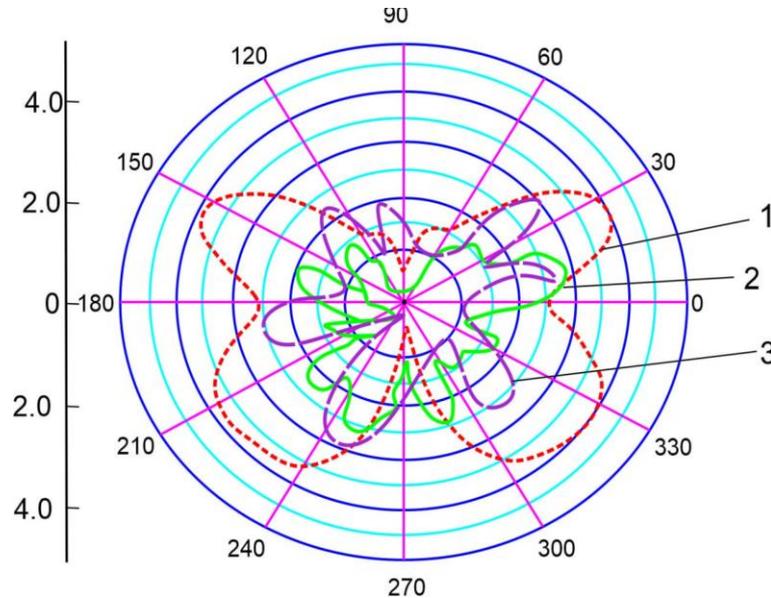


Рисунок 3. Эпьюры контурных напряжений оболочки на разных частотах (Q235): 1. $\omega=20$ Гц; 2. $\omega=40$ Гц; 3. $\omega=80$ Гц.

Потенциал падающей продольной волны, заданной в декартовой системе координат, также можно записать в декартовой системе координат:

$$\varphi_1^{(p)} = A e^{i(\gamma y - \omega t)} \sum_n \epsilon_n i^n J_n(k_\alpha r) \cos n\theta, \psi_1^{(p)} = \chi_1^{(p)} = 0.$$

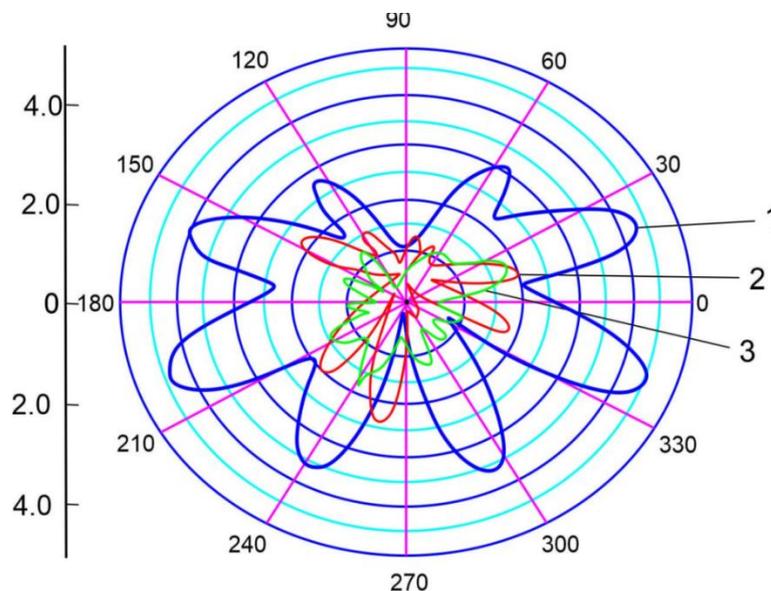


Рисунок 4. Эпьюры контурных напряжений оболочки на разных частотах (X70): 1. $\omega=20$ Гц; 2. $\omega=40$ Гц; 3. $\omega=80$ Гц.

Произвольные константы интегрирования определяются из системы алгебраических уравнений (18) с комплексными коэффициентами с восемью неизвестными.

В расчетах использовалось трехпараметрное ядро Колтунова–Ржаницына: $R(t) = Ae^{-\beta t} / t^{1-\alpha}$, при $A = 0,048$; $\beta = 0,05$; $\alpha = 0,1$. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния тоннеля с круговым поперечным сечением, расположенного в вязкоупругой полуплоскости, под действием гармонической волны, т.е. эпюры контурных напряжений оболочки на различных частотах представлены на рис. 3 и 4 ($\frac{h}{a} = 2,0$). Для получения результатов численного расчета, как отмечалось выше, использовались значения стальной оболочки и трехпараметрического ядра релаксации Колтунова-Ржаницына. Максимальные контурные напряжения в оболочке соответствует значениям частот $\omega \in [19 \div 30] \text{ Hz}$. Из эпюр видно, что увеличение волнового числа βa позволяет уменьшить максимальное значение напряжений. Учет вязкостных свойств материалов позволяет снизить перемещения и напряжения на 10–15%. А распределение напряжений в области длинных волн ($\frac{D}{\lambda} > 1$) оказалось выше до 15%. Аналогично, под действием поперечной волны напряжения достигают своих максимальных значений при углах $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi = 135^\circ$. Изменение контурного напряжения ($r=a$) в зависимости от волнового числа представлено на рис. 5, где: линией 1- $\theta = 170^\circ$; линией 2- $\theta = 110^\circ$; линией 3- $\theta = 65^\circ$; линией 4- $\theta = 50^\circ$ и линией 5- обозначено статическое состояние. Из графиков видно, что контурное напряжение достигает максимального значения на низких частотах.

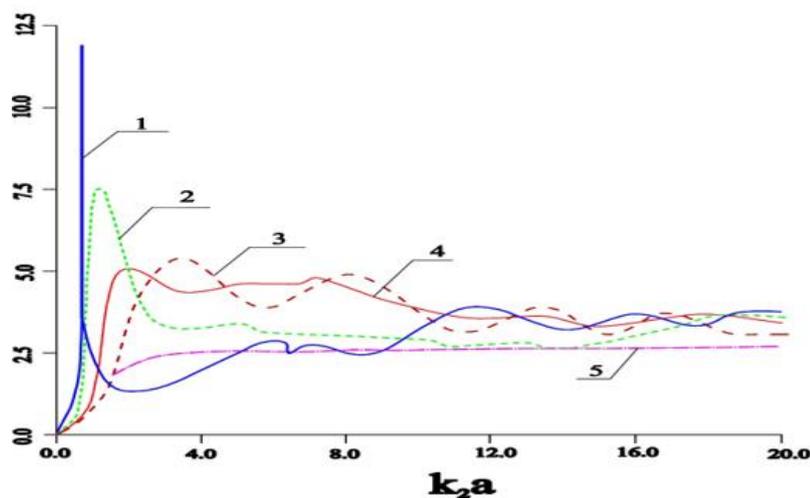


Рис. 5. Изменение контурного напряжения под разными углами в зависимости от частоты

В этом случае мы видим, что может возникнуть явление резонанса. Численно проверено изменение контурных напряжений для двух разных материалов Q235 и X70. Численные результаты получены для продольных падающих волн и представлены на рисунках 6 и 7.

Таблица 1.

Изменение контурных напряжений для двух разных материалов Q235 и X70

Материалы	δ	η	ν	γ_α
Q23B	099	1.05	2.0	30
X70	0-3.0	1.02-1.10	1.0-5.0	0-90

В таблице 1: ν - отношение глубины проникновения h к длине внутреннего радиуса, $\eta = \frac{b}{a}$ - соотношение радиусов, $\delta = \frac{\omega b}{c_{p1}}$ - безразмерная частота. Для построения эпюр были приняты следующие параметры: $\eta = 1.05$; $\nu = 2.0$; $\theta_\alpha = 30^\circ$. В данной главе для изучения факторов влияния мелкозасыпанного трубопровода использован метод разложения волновой функции по собственным формам.

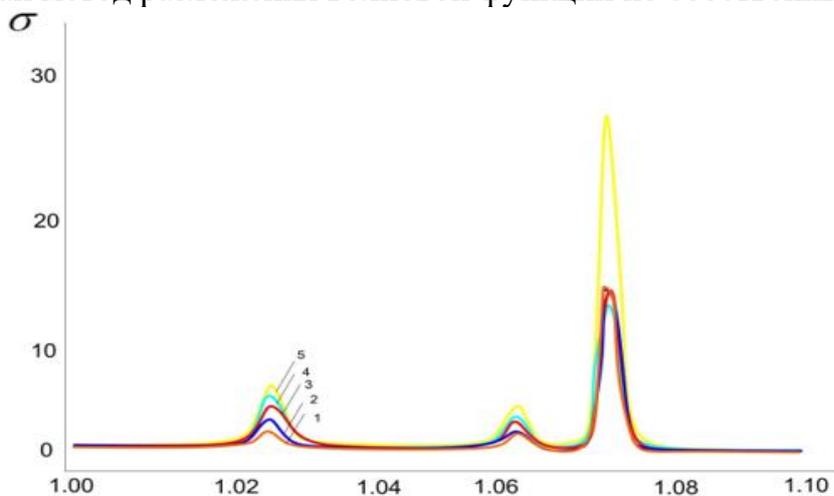


Рисунок 6. Изменение контурных напряжений в зависимости от соотношения радиусов (Q235)

1. $\theta = 0^\circ$, $\theta_\alpha = 45^\circ$; 2. $\theta = 60^\circ$, $\theta_\alpha = 45^\circ$; 3. $\theta = 60^\circ$, $\theta_\alpha = 60^\circ$;
4. $\theta = 60^\circ$, $\theta_\alpha = 90^\circ$; 5. $\theta = 60^\circ$, $\theta_\alpha = 0^\circ$;

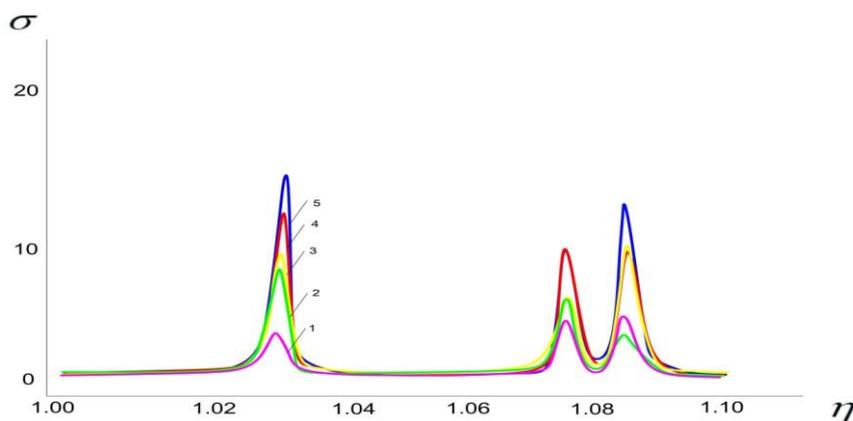


Рисунок 7. Изменение контурных напряжений в зависимости от соотношений радиусов (X70)

1. $\theta = 0^\circ$, $\theta_\alpha = 45^\circ$; 2. $\theta = 60^\circ$, $\theta_\alpha = 45^\circ$; 3. $\theta = 60^\circ$, $\theta_\alpha = 60^\circ$;
4. $\theta = 60^\circ$, $\theta_\alpha = 90^\circ$; 5. $\theta = 60^\circ$, $\theta_\alpha = 0^\circ$;

Численные результаты показывают, что количество падающих волн, соотношение диаметра и толщины, а также глубина залегания напрямую влияют на реакцию трубопровода на сейсмические волны. По мере увеличения количества падающих волн отклик, отображаемый через определенные промежутки времени, экспоненциально уменьшается. В диапазоне определенных толщин реакция трубы (или концентрация напряжений) будет иметь три высших значения.

Если при $r = b$: $\sigma_{rr1} = \sigma_{rr2}$; $\sigma_{r\theta1} = \sigma_{r\theta2}$; $\sigma_{rr1} = k_r(u_{r1} - u_{r2})$, $\sigma_{r\theta1} = k_\theta(u_{\theta1} - u_{\theta2})$
написать последние две условия контакта в виде

$$u_{r1} - \frac{1}{k_r} \sigma_{rr1} = u_{r2}, u_{\theta1} - \frac{1}{k_\theta} \sigma_{r\theta1} = u_{\theta2} \quad (25)$$

Тогда если $k_r = k_\theta \rightarrow \infty$, то в этом случае на границе оболочки и среды возникает условие жесткого контакта. Если $k_r = k_\theta = 0$, то получим полость в вязкоупругой среде. Численные результаты представлены на рисунке 8, которые были получены с использованием значений, приведенных ниже:

$$\nu_1 = 0.20, \nu_2 = 0.25, \mu_{12}^* = \mu_1 / \mu_2 = 2.40, C_{p12}^* = c_{p1} / c_{p2} = 1.8, \\ a = 1, b = 1.25, \bar{\alpha}_1 a = 0.1, k_r = k_\theta = k\mu_1 / b, k = 10.$$

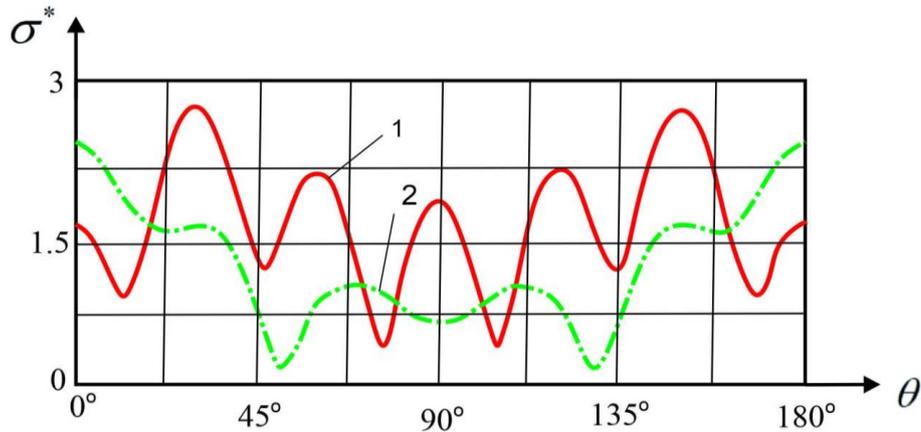


Рисунок. 8. Угловое изменение концентрации напряжений.

1-сплошная линия $k=0.11$; 2-пунктирная линия $k=0.12$ ($\alpha_1 a = 1.15$)

Разработан алгоритм и программа определения напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки, контактирующей со средой под воздействием сейсмических волн. При контакте реакция цилиндрической оболочки с грунтом оказалась значительной.

В третьей главе диссертации, озаглавленной "**Особенности влияния поверхностной (Рэлеевский) волны на цилиндрическую оболочку в полуплоскости**", изучено влияние поверхностной волны на оболочку, расположенную в вязкоупругой полуплоскости (рис. 9).

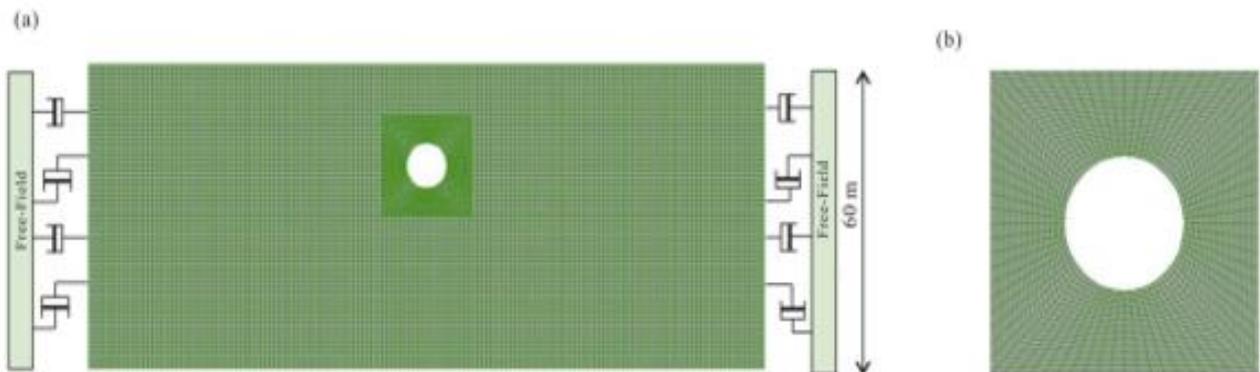


Рис. 9. Схема расчета

Для случая плоской деформации волновые уравнения, выраженные потенциалами, представляющими волну Рэлея, имеют следующий вид (рис. 9):

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}; \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}; \quad (26)$$

Для решения поставленной задачи были использованы аналитические и численные методы (метод конечных элементов).

Решение системы уравнений выражается следующими специальными функциями:

$$\begin{aligned}
 \phi_1(r) &= A_{1m} Z_m(\alpha_1 r) + A_{2m} W_m(\alpha_1 r); \Psi_{z1}(r) = A_{3m} Z_m(\beta_1 r) + A_{4m} W_m(\beta_1 r); \\
 \Psi_{r1}(r) - \Psi_{\theta1}(r) &= 2A_{5m} Z_{m+1}(\beta_1 r) + 2A_{6m} W_{m+1}(\beta_1 r); \\
 \Psi_{r1}(r) + \Psi_{\theta1}(r) &= 2A_{13m} Z_{m-1}(\beta_1 r) + 2A_{14m} W_{m-1}(\beta_1 r); \\
 \phi_2(r) &= A_{7m} Z_m(\alpha_1 r) + A_{8m} W_m(\alpha_1 r); \Psi_{z2}(r) = A_{9m} Z_m(\beta_1 r) + A_{10m} W_m(\beta_1 r); \\
 \Psi_{r2}(r) - \Psi_{\theta2}(r) &= 2A_{11m} Z_{m+1}(\beta_1 r) + 2A_{12m} W_{m+1}(\beta_1 r); \\
 \Psi_{r2}(r) + \Psi_{\theta2}(r) &= 2A_{15m} Z_m(\beta_1 r) + 2A_{16m} W_{m+1}(\beta_1 r),
 \end{aligned} \tag{27}$$

При использовании аналитических методов и метода конечных элементов задача сводится к системе алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами. Численные результаты представлены на рисунке 10.

На рисунке 10 показано изменение контурного напряжения в зависимости от частоты. На рисунке выбираются и сравниваются результаты угла θ при 90° и 180° . Как видно, разница в сопоставлениях достигает 15%. Как видно из рисунка, контурные напряжения уменьшаются с увеличением глубины.

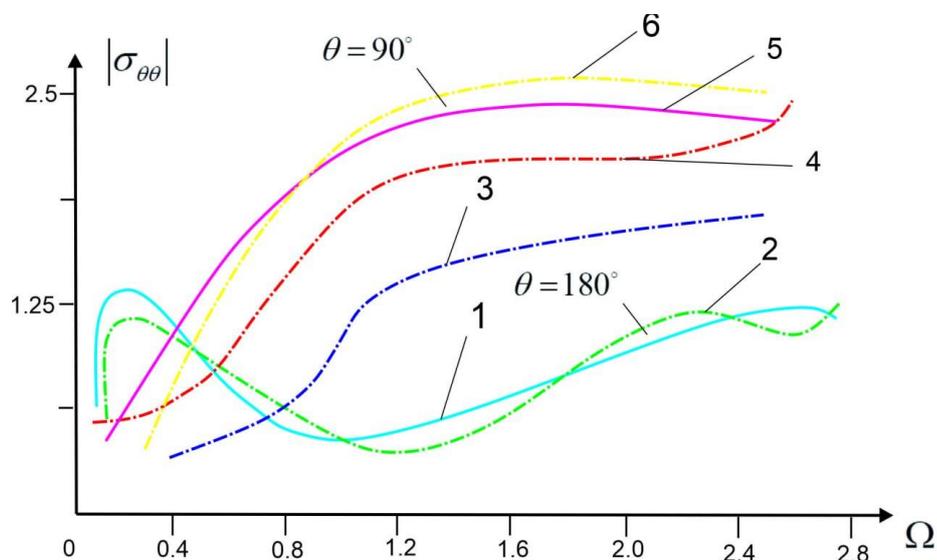


Рисунок 10. Зависимость контурного напряжения от частоты ($\frac{H}{a} = 2.0$):

1.N=544; 2.N=278; 3.N=145; 4.N=278; 5.N=450; 6.N=545;

Аналогично, радиальное напряжение на оболочку и глубина оболочки были изучены для различных значений. На основе численных исследований было обнаружено, что в результате воздействия волны Рэлея (R) вдоль оси цилиндрической оболочки в диапазоне $0.135 \leq \frac{h}{\lambda} \leq 0.163$ напряжения сдвига и изгиба также достигают своего максимального значения. В результате воздействия волны Рэлея на поверхность вдоль оси в цилиндрической оболочки напряжения сдвига и изгиба достигают своего максимального значения. Оказывается, что радиус тоннеля оказывает более сильное влияние на увеличение сейсмических напряжений, чем глубина заглубления тоннеля. Установлено, что большой радиус тоннеля приводит к более высокому росту осевого напряжения и снижению сейсмического сдвига и изгибающего напряжения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. При оценке сейсмического напряженно-деформированного состояния подземных сооружений, с учетом глубины заложения сооружения и воздействия волн, отраженных от свободной поверхности, аналитические и численные результаты изучены недостаточно. Учет влияния волн, отраженных от свободной поверхности, на конструкцию сооружения играет важную роль в оценке напряженно-деформированного состояния. Использование современного программного обеспечения (Matlab, ABAKUS) позволяет решать поставленные задачи.

2. Уравнения движения цилиндрической оболочки и окружающей ее среды в процессе волнового падения описываются линейными интегро-дифференциальными уравнениями теории вязкоупругости. Предполагая, что в контакте оболочки и среды находится безмассовый слой, на бесконечности ставили условия поглощения волны Зоммерфельда, и изучено динамическое напряженно-деформированное состояние.

3. Вязкостные свойства материалов получены с использованием интегрального соотношения Больцмана-Вольтера. В качестве ядра релаксации использовалось слабо сингулярное трехпараметрическое ядро Ржаницына-Колтунова. При решении задач гармонического волнового нагружения (и дифракции) получена система интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, выраженных через потенциалы смещений, с использованием уравнения Ламе, выраженного через перемещения, разработана методика и алгоритм получения аналитического решения на основе методов Гаусса, Лапласа и специальных функций.

4. Для изучения факторов влияния линии неглубокой засыпанной оболочки был использован метод разложения волновой функции по собственным формам. Численные результаты показывают, что количество падающих волн, отношение диаметра к толщине и глубина заглабления напрямую влияют на реакцию трубы на сейсмическую волну. Оказывается, что с увеличением числа падающих волн реакция, показываемая в промежутках, экспоненциально убывает. В определенном диапазоне толщин трубная реакция (или концентрация напряжений) имеет до трех максимальных значений.

5. Разработаны методика, алгоритм и программа определения напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки, контактирующей со средой через безмассовые элементы, под действием сейсмической волны. Было обнаружено, что реакция цилиндрической оболочки на грунт в контакте через безмассовые элементы значительна.

6. В результате воздействия волны Рэлея на поверхности Земли, вдоль оси цилиндрической оболочки, она достигает своего максимального значения в диапазоне $0.135 \leq \frac{h}{\lambda} \leq 0.163$ напряжений сдвига и изгиба. Оказывается, что радиус тоннеля оказывает более сильное влияние на рост сейсмических напряжений, чем глубина заглабления туннеля. Установлено, что больший радиус тоннеля приводит к более высокому росту осевого напряжения и снижению сейсмического сдвига и изгибающего напряжения.

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

BUKHARA INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KHOJIEV AZIZJON KHOLMURODOVYCH

**SURFACE-WAVE LOADING ON A VISCOUS-ELASTIC SEMI-PLANE
CYLINDRICAL SHELL**

01.02.04 – Mechanics of deformable solids

**DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Technical Sciences**

Bukhara- 2025

The theme of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences was registered under No. B2025.1.PhD/T5207 by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan.

The dissertation was accomplished at Bukhara Engineering-Technological Institute.

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:

Boltaev Zafar Ikhtiyorovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc),
Professor

Official opponents:

Mavlanov Tulkin Mavlanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Usmonov Botir Shukurillaevich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Leading organization:

Namangan State Technical University

The dissertation defense will be held on May 23, 2025 at 10⁰⁰ o'clock at the meeting of the One-time Scientific Council based on the 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. 358). (Address: 100118, 15. Qayum Murtazaev street, Bukhara. Phone: (+99865) 223-78-84).

The disseretation abstract is distributed on May 08, 2025.

(Mailing report № 1 on April 10, 2025)



M.Kh. Teshayev

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

Sh.R. Akhmedov

Scientific Secretary of the one-time Scientific Council on awarding scientific degrees, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

B.S. Rahmonov

Chairman of the one-time Scientific Seminar at the Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of Technical Sciences (DSc)

INTRODUCTION (abstract of a PhD dissertation)

Relevance and necessity of the dissertation topic. In the world, the design and construction of earthquake-resistant buildings and structures in seismically active areas, the prevention of damage or destruction, the study of the interaction of deformable structural elements of shallow-lying underground structures with the environment, as well as the development and application of calculation methods occupy one of the leading places. On a global scale, under the influence of seismic and seismic-explosive waves, the introduction into practice of structures that ensure high seismic resistance and cost-effectiveness of underground structures (tunnels, subways, underground pedestrian crossings, engineering communication systems: water supply, sewerage pipelines, oil and gas pipelines, etc.) is required. In this regard, when studying the influence of seismic waves arising from the destruction of underground pipelines and collectors, earthquakes, and powerful explosions on underground shell structures in seismic regions, as well as the strength of shells, it is important to use mathematical models and modern calculation methods to determine the dynamic stress-strain state, taking into account the viscoelastic properties of materials. In the world, one of the important tasks is the development of the theory of studying the scientific basis of the problem of seismic wave action on multilayer composite cylindrical shells with aggregates, improving the scientific base, conducting targeted scientific research in these areas for the development of calculation methods.

In our republic there are various branches of construction and mechanical engineering. underground under dynamic loads from composite shells Particular attention is paid to the development of measures for practical implementation. In this regard, the development and research of improved mathematical models and effective calculation methods that ensure the strength and competitiveness of underground construction structures in industrialized countries is one of the pressing problems of modern mechanics.

Compliance of the research with the priority direction of development of science and technology of the Republic of Uzbekistan. This dissertation is part IV of the development of science and technology of the Republic of Uzbekistan. It was carried out in accordance with the priority direction "Mathematics, mechanics and informatics".

Review of international scientific research on the topic of the dissertation.

Scientific research on the problems of loading a cylindrical shell in a viscoelastic half-plane with surface and body waves is carried out in research centers in foreign countries, including the USA (New York State; University of Texas, Austin, TX; Cornell University, Ithaca), Iran (University of Tehran, Tehran), Russia (N.G. Chernyshevsky Saratov State University, Tomsk Polytechnic University, St. Petersburg Technical University, Moscow Institute of Electronic Machines (Technical University), Perm State University, Moscow State University, Novosibirsk Branch of the Academy of Sciences, etc.), Ukraine (S.P. Timoshenko Mechanical Institute of the Ufa University of Mechanical Engineering, Kyiv), Belarus (Belarusian State University, Minsk), Brazil (Catholic University of Rio de Janeiro), Armenia (Institute of Mechanics of the Ministry of Foreign Affairs of

Armenia), England (Oxford University), Azerbaijan (Physical and Mathematical Sciences of the Azerbaijan National Academy of Sciences), Kazakhstan (Kazakh-Turkish University named after A. Yasawi) International University, Turkestan). In these scientific centers, much attention is paid to the study of the processes of wave propagation in deformable solids.

Level of study of the problem. The issues of loading by surface and volume waves on a cylindrical shell in a viscoelastic half-plane were studied from a scientific point of view by famous foreign scientists: Ilyushin A.A., Gorshkov A.G., Volmir A.S., Shemyakin E.I., Guz A.N., Troyanovsky I.E., Kiyko I.A., Molotkov L.A., Novichkov Yu.I., Krauklis P.V., Slepyan L.I., Matveenkov V.P., Shardakov I.N., Starovoytov E.I., Anofrikova N.S. and others.

In solving this problem, Uzbek scientists Urazbaev M.T., Shirinkulov T.Sh., Rakhmatulin H.A., Kabulov V.K., Rashidov T.R., Muborakov Y.N., Mardonov B.M., Sultanov K. .S., Mamatkulov Sh.M., Mirsaidov M.M., Badalov F.B., Khoimetov G.Kh. , Ishankhodzhaev A.A., Mavlonov T.M., Mirzaev I.K., Abdusattorov A.A., Safarov I.I., Khudaynazarov XX, Khusanov B.E., Rakhmonov B.S., Teshaev M.Kh. ., Yuldashev Sh.S., Abdukodirov S.A., Usarov M.K. and others contribute taking into account the rheological properties of the material, seismic blasting operations of underground structures of various shapes (rod, cylindrical and spherical bodies).) has developed and is developing methods for studying the effects of waves and calculation algorithms. Despite the above, there are a number of problems that have not been solved at the moment. In deep works it is assumed that the deepening of structures is taking into account the surface of the earth and surface waves. Since the study of dynamic processes in dissipative-inhomogeneous waveguides enriches the dynamics of deformable solids theoretically, its new results related to energy dissipation are of great practical importance.

The connection between the dissertation topic and the scientific plans of the university where the dissertation was completed. The dissertation was completed in accordance with the research plan of the Bukhara Engineering and Technological Institute FM-01-2020-2024 within the framework of the project "Mathematical modeling of mechanical processes in viscoelastic bodies".

Purpose of the study It consists of a mathematical formulation of the problem of loading by surface waves in a cylindrical shell located in a bubble-elastic half-space, the development of methods and algorithms for solving it, and the analysis of numerical results.

Research objectives:

development of a mathematical formulation of the problem of finding the dynamic stress-strain state caused by longitudinal, transverse and surface (Rayleigh) waves on a cylindrical shell located in a viscoelastic half-space, a solution methodology and algorithm;

to provide a comparative assessment of the dynamic stress-strain state of the shell and its surrounding environment as a result of longitudinal and transverse wave loading of a viscoelastic cylindrical shell;

study of the dynamic stress-strain state created by a surface (Rayleigh) wave in a viscoelastic semi-flat cylindrical shell using the finite element method;

comparison of a surface wave (Rayleigh) with the accumulation of stresses on the surface of an unreinforced cylindrical cavity.

Object of study in the form of a cylindrical shell.

Subject of research assessment of longitudinal or transverse and surface wave loading of a long-viscoelastic cylindrical shell depending on the geometric and physical-mechanical parameters of the entire system.

Research methods. During the study, the theory of elasticity was used to solve integro-differential equations of partial derivative of mechanics of deformable solids, finding solutions through special functions of mechanics of deformable solids and mathematical physics. Muller and Fouret integral substitutions, Gauss methods were used.

Scientific novelty of the research consists of:

The problem of finding the dynamic stress-strain state created by the influence of longitudinal, transverse, and surface (Relei) waves on a cylindrical shell located in a viscoelastic half-space has been mathematically posed, and an analytical and numerical method and algorithm for its solution have been developed;

It has been established that the influence of immersion depth on the stress-strain state of the viscoelastic cylindrical shell as a result of surface wave loading depends on the incident wave length and with increasing depth, the displacements decrease exponentially;

It has been established that the dynamic stresses arising as a result of wave propagation under the influence of a harmonic periodic force in the cylindrical shell of a viscoelastic half-plane depend on the immersion depth of the deformation state, the frequency of the forced force, and the amplitude of the harmonic force;

It has been established that the stress-strain state of a cylindrical shell in the region of long waves is 20% greater than the stress of the static state.

Practical results of the research consists of:

Seismic Resistance of Composite Cylindrical Shells with Multilayer Liquid methods have been developed for calculating the strength of cylindrical bodies under stress and strain conditions caused by wave loading;

Seismic Resistance of Composite Cylindrical Shells with Multilayer Liquid the problem of finding a finite number of components of complex frequencies in a spectral problem has been solved;

Seismic wave in composite cylindrical shells with multilayer fluid the distribution of stresses in a deformable medium under longitudinal and transverse loading and in a cylindrical space protected by a cylindrical shell is determined;

Reliability of research results The formulation of the boundary value and spectral problem is justified by the use of solution methods based on the rigor of the derived mathematical relationships and comparison with solutions obtained by other scientists.

Scientific and practical significance of the research results.

The scientific significance of the research results is explained by the significant contribution they make to the development of the theory of wave loading and diffraction in pipelines with certain parameters located in an elastic medium.

The practical significance of the research work lies in the emergence of the possibility of studying new patterns of stress and strain conditions caused by wave

loading in pipelines with given parameters located in an elastic medium, a finite number of complex frequencies at boundary and spectral boundaries. The problem is explained by solving the problem of searching for substances.

Implementation of research results. Based on the obtained results on the methods and algorithm for calculating the loaded state of surface waves in a cylindrical shell in a viscoelastic half-plane:

The method developed in the dissertation for the decomposition of the wave function according to its own forms was used in the fundamental project F-4-14, carried out at the Bukhara Engineering and Technological Institute in 2012-2016 on the topic "Development and calculation of the theory of research of the stress-strain state of an underground curved pipeline with fluid flow under the influence of external forces" (certificate of the Bukhara Engineering and Technological Institute No. 1-1-01/04-70 dated January 6, 2025). As a result, it was possible to determine the forms of the influence of factors on multilayer composite shallow pipelines through which a viscous fluid flows;

The methodology for solving homogeneous differential equations in first-order partial derivatives was used in the fundamental project OT-F4-01 "Development of methods and development of the theory of studying the nonlinear dynamic stress-strain state of curvilinear sections of multilayer composite pipes through which viscous fluid flows under the influence of temperature and dynamic loads," carried out at the Tashkent Chemical-Technological Institute in 2016-2020 (certificate of the Tashkent Chemical-Technological Institute No. 1/01-2247 dated August 27, 2024). As a result, the dispersion relationships characterizing the stress-strain state and attenuation when loaded with a volumetric wave on a viscoelastic cylindrical shell were determined;

As a result of the impact of the R wave on the earth's surface, the effectiveness of achieving the maximum value in the range of axial displacement and bending stress in the cylindrical shell, as well as the methods of ensuring the seismic resistance of the connecting engineering pipelines of the structures defined in the dissertation, were used in "Uzjamoaloyiha" and "Qurilishloyiha" LLC (Certificate No. 25/1-1114 dated December 10, 2024 of the Seismic Safety Department of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan). As a result, the level of preliminary identification of areas where resonance may occur increased to 20%, and due to the selection of rheological parameters of materials, it was possible to increase the lightness, cost-effectiveness, and durability of structures to 30%.

Publication of research results. In total, 14 scientific works have been published on the topic of the dissertation, including 6 articles in scientific journals, including 3 domestic and 3 foreign scientific journals, which present the main scientific results of doctoral dissertations of the highest certification. The Commissions of the Republic of Uzbekistan are recommended for publication in journals.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. Dissertation size 107 created a page.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Hojiyev A.X., Boltayev Z.I., Ruziyeva M.A., Sobirov S.J. Quasi-static stress-strain state axisymmetric bending of a cylindrical shell. The multidisciplinary journal of science and technology. – 2024. – VOLUME-4, ISSUE-8. – P.13-17 (IF-8.848)
2. Hojiyev A.X., Boltayev Z.I. Tunnel qoplamasi va grunt massivi kontaktdagi deformatsiyalar farqini e'tiborga oladigan statik hisoblash usuli. Ilmiy texnikaviy jurnal. Fan va texnologiyalar taraqqiyoti. – Buxoro. –2024. – № 5. – 68-73 б. (05.00.00, №24)
3. Hojiyev A.X., Bebutov N.S. Egilishda ichki kuch-faktorlarini nazariya va tajribada aniqlash. Ilmiy texnikaviy jurnal. Fan va texnologiyalar taraqqiyoti. – Buxoro. – 2022. –№3. –352-357 б. (05.00.00, №24)
4. Hojiyev A.X., Ruziyev T.R., Umarov A.O., Nuriddinov B.Z. About distribution natural waves in dissipative inhomogeneous flat bodies. On the propagation of free waves in viscoelastic layered bodies. Discovery Publication. All Rights Reserved. www.discoveryjournals.org. –2018. – P.235-244
5. Hojiyev A.X., Ruziyev T.R., Nuriddinov B.Z. On the propagation of free waves in viscoelastic layered bodies. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology. – 2018. – V-6, №I4. – P.1-6
6. Boltayev Z.I., Hojiyev A.X., Sabirova R.A. Qovushoq-elastik silindrik qobiqda xos to'liqinni tarqalish xususiyatlari. FarPI Ilmiy-texnika jurnali. – Farg'ona. – 2024. –№5. –14-19b. (05.00.00, №20)

II bo'lim (II часть; part II)

7. Hojiyev A.X., Bebutov N.S., Asrayev Z.R. Methodology of teaching applied mechanics. Cite as: aip conference proceedings **2647**, 030031 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0118009> published online: 01 november 2022.
8. Hojiyev A.X., Bebutov N.S., Asrayev Z.R. Elastiklik modulini tajribada aniqlash. Kondensatsiyalangan holat fizikasining zamonaviy muammolari. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. – Buxoro. – 2016. – 2-tom. – 91-92 b.
9. Hojiyev A.X., Bebutov N.S. Deformatsiyalangan va kuchlanganlik holatlarini tajribada o'rganishning ahamiyati va prinsiplari. Kasb-hunar ta'limi o'qituvchilarini tayyorlash muammolari va rivojlantirish istiqbollari mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani maqolalari to'plami. –Buxoro. –2015. –460-463 b.
10. Хожиев А.Х., Болтаев З.И., Нарзуллоев М. О воздействии гармонических волн на многослойное подкреплённое отверстие с жидкостью. Сборник докладов международной научно-технической конференции. – Бухара. – 2024. – С.49-54

11. Хожиев А.Х., Сафаров У.И., Жураев Ш.И. Распространение поверхностной волны на вязкоупругое моментное полупространство. Международная научная конференция “Неклассические уровнения математической физики и их приложения”. – Ташкент. – 2024. – С.219-221

12. Khojiyev A.X., Mirzayeva G.T., Ergasheva N.Sh., Zaripov B.Sh. Calculation of the Influence of Internal Hydrostatic Pressure on the Frequency of Natural Oscillations of a Pipeline Wire. 1st EduVision: Global Innovations in Learning and Teaching Conference. – 2025. – Vol.1. – P. 147-150

<https://euro-conferences.org/index.php/eduvision>

13. Boltayev Z.I., Khojiyev A.X., Ruziyeva M.A., Jumayeva A.A. Diffraction of a Longitudinal Wave by a Cylindrical Body with a Solid Homogeneous Fluid in a Solid-Elastic Medium. 1st EduVision: Global Innovations in Learning and Teaching Conference. – 2025. – Vol.1. – P. 167-172

<https://euro-conferences.org/index.php/eduvision/article/view/68>

14. Тешаев М.Х., Ходжиев А.Х., Рузимов А.Ш., Саипназаров Дж. Установившиеся вынужденные и собственные колебания диссипативно-неоднородной пластинчатой системы с точечными связями. Материалы международной научно-технической конференции. – Карши. – 2025. – С. 97-102.

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

**Bosishga ruxsat etildi: 08.05.2025.
Qog‘oz bichimi 60x84 1/16.
Temes New Roman garniturasida chop etildi.
Hajmi 3 bosma taboq. Adadi 100 nusxa. Buyurtma № 353.**

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

