

БУХОРО МУҲАНДИСЛИК – ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

БУХОРО МУҲАНДИСЛИК – ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ

АХМЕДОВ МАҚСУД ШАРИПОВИЧ

**ҚОВУШОҚ – ЭЛАСТИК МУҲИТ БИЛАН КОНТАКТА БЎЛГАН
ЦИЛИНДРИК ҚОБИҚНИНГ ЭРКИН ВА МАЖБУРИЙ ТЕБРАНИШ
ХУСУСИЯТЛАРИ**

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

**ФИЗИКА – МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Бухоро – 2022

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

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

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

Ахмедов Максуд Шарипович

Қовушоқ-эластик муҳит билан контактда бўлган цилиндрик қобикнинг эркин ва мажбурий тебраниш хусусиятлари.....3

Ахмедов Максуд Шарипович

Свойства свободных и вынужденных колебаний цилиндрической оболочки, контактирующей с вязкоупругой средой21

Axmedov Maqsud Sharipovich

Properties of Free and Forced Vibrations of a Cylindrical Shell Contacting with a Viscoelastic Medium39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works43

БУХОРО МУҲАНДИСЛИК – ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

БУХОРО МУҲАНДИСЛИК – ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ

АХМЕДОВ МАҚСУД ШАРИПОВИЧ

**ҚОВУШОҚ – ЭЛАСТИК МУҲИТ БИЛАН КОНТАКТДА БЎЛГАН
ЦИЛИНДРИК ҚОБИҚНИНГ ЭРКИН ВА МАЖБУРИЙ ТЕБРАНИШ
ХУСУСИЯТЛАРИ**

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Бухоро – 2022

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2022.3.PhD/FM18 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Бухоро муҳандислик-технология институти да бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) институт веб-сайтида (www.bmti.uz) ва «Ziynet» Ахборот таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар :	Тешаев Мухсин Худойбердиевич физика-математика фанлари доктори (DSc), доц.
Расмий оппонентлар:	Мавлонов Тўлқин Мавлонович техника фанлари доктори, профессор Исмаилов Кубаймурат техника фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	Тошкент кимё – технология институти

Диссертация химояси Бухоро муҳандислик-технология институти ҳузуридаги PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «19» декабр соат 14:00 даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 200100, Бухоро шаҳар, Қ. Муртазов кўчаси, 15. Тел.: (+99865) 223-78-84; факс: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz).

Диссертация билан Бухоро муҳандислик-технология институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (№ 404, рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: (200100, Бухоро шаҳар, Қ. Муртазов кўчаси, 15. Тел.:(+99895) 604-44-70).

Диссертация автореферати 2022 йил «07» декабр куни тарқатилди.
(2022 йил «19» ноябрдаги №3 рақамли реестр баённомаси).

Н.Н. Садуллаев

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

З.И. Болтаев

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д. (DSc)

М.З. Шарипов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д. (DSc), профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясига автореферат)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Жаҳонда ер ости иншоотларнинг сейсмик жиҳатдан фаол бўлган ҳудудларда зилзилабардошлигини таъминлаш, туннеллар, қувурларнинг талофат кўриши ёки вайрон бўлишининг олдини олиш учун муҳит ва иншоот контактларидаги муносабатларга ҳамда цилиндрик қобик конструктив элементлари билан сейсмик кучларнинг ўзаро таъсири масалаларига алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган хорижий давлатларда, жумладан, АҚШ, Франция, Япония, Италия, Россия, Хитой, Туркия ва бошқа мамлакатларда ер ости иншоотларининг зилзилабардошлилигини таъминлаш, қобик конструкцияларида ҳосил бўладиган динамик кучланиш ва деформацияларни рухсат этилган чегарада камайтириш муҳим ҳисобланади. Бу борада, муҳит билан алоқада бўлган цилиндрик қобикли конструкцияларни лойиҳалаш жараёнида, эластик ёки қовушоқ-эластик ярим текисликларда содир бўладиган физик жараёнларни ҳамда уларда ҳосил бўладиган зўриқишлар йиғилишининг энг кичик ҳолатда тақсимланишини таъминловчи ишончли ҳисоблаш усулларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда цилиндрик қобикли конструкцияларнинг деформацияланувчан муҳит билан алоқасини ҳисобга олувчи турли хил назариялар, моделлар ва ҳисоблаш усуллари мавжуд. Бундай моделлар асосида машина ва аппаратларнинг янги авлодини яратиш ҳамда мавжудларини такомиллаштиришга қаратилган кенг кўламли илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, муҳит билан контактда бўлган цилиндрик қобикларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилишда материалларнинг реологик хоссалари, геометрик ўлчамлари ва физик-механик параметрларини ҳисобга олган ҳолда ҳавфли кесимлардаги кучланишларни аниқлаш долзарб вазифалардан ҳисобланмоқда.

Республикамизда иншоотларининг мустаҳкамлигини ошириш ҳамда уларнинг ҳавфсизлигини таъминлаш бўйича кенг кўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2020 йил 29 октябрда Ўзбекистон Республикаси Президентининг “Илм-фанни 2030 йилгача ривожлантириш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида”ги Фармонида, жумладан, «...илмий-инновацион салоҳиятдан кенг фойдаланиш, истиқболда илм-фанни мунтазам ислоҳ қилиб боришнинг устувор йўналишларини белгилаш, замонавий билимга эга ва мустақил фикрлайдиган юқори малакали кадрлар тайёрлаш,...»¹ вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга оширишда, жумладан, муҳит билан алоқада бўлган цилиндрик қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати ва динамик хусусиятларини аниқлаш методикасини ишлаб чиқиш ва ривожлантириш муҳим ҳисобланади.

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2020 йил 29 октябрдаги ПФ-6097-сон “Илм-фанни 2030 йилгача ривожлантириш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида”ги Фармони

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2020 йил 30 июлдаги ПҚ-4794-сонли «Ўзбекистон Республикаси аҳолиси ва ҳудудининг сейсмик хавфсизлигини таъминлаш тизимини тубдан такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ва Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2020 йил 26 августдаги 515-сонли «Ўзбекистон Республикаси Фавқулодда вазиятларнинг олдини олиш ва бундай вазиятларда ҳаракат қилиш давлат тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида»ги Қарори, шунингдек, мазкур фаолиятга тегишли меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация иши бўйича тадқиқотлар Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар ривожланишининг IV. «Математика, механика, иншоотлар сейсמודинамикаси ва информатика» устувор йўналишига мос келади.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Сейсмик тўлқинлар таъсирида қовушоқ-эластик муҳит билан тўлиқ контактда бўлган цилиндрик қобик ва жисмларнинг динамик кучланганлик-деформацияси муаммосини илмий нуқтаи-назардан таниқли хорижий давлат олимлари Ильющин А.А., Шемякин Е.И., Трояновский И.Е., Кийко И.А., Горшков А.Г., Гузь А.Н., Булычев Н.С., Фотиева Н.Н., Дорман И.Я., Оганесов Г.И., Гринченко В.Т., Молотков Л.А., Новичков Ю.И., Петрашень Г.И., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Старовойтов Э.И., Кольский Г., Davis R.M., Wayt J.A., Miker T., Maytsler A., Ahenbah J.D., Shafer V.V., ва бошқа кўплаб олимлар томонидан илмий тадқиқот ишлари олиб борилган.

Ер ости иншоотларини кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини ўрганиш ва баҳолаш бўйича Республикамиз олимлари томонидан Рахматулин Х.А., Ўрозбоев М.Т., Кабулов В.К., Рашидов Т.Р., Ширинкулов Т.Ш., Хожметов Г.Х., Ишанходжаев А.А., Мубораков Я.Н., Буриев Т., Мирсаидов М.М., Мардонов Б.М., Султонов К.С., Маматкулов Ш.М., Бадалов Ф.Б., Мирзаев И., Мавлонов Т.М., Юлдашев Ш.С., Абдусатторов А., Сағдиев Х., Сафаров И.И., Тешаев М.Х., Абдуқодиров С., Худойназаров Х., Бўриев А.Т. ва бошқа кўплаб мутахассислар муҳит билан контактда бўлган пластинкасимон, цилиндрик ёки сферик кўринишдаги жисмларда тўлқин юкланиши масалаларини ҳисоблаш усулларини ривожлантиришда салмоқли натижаларга эришилди.

Шу билан бирга, муҳитнинг қовушоқлик хусусиятларини ҳамда цилиндрик жисм билан тўлиқ контактда бўлган ҳолатни ҳисобга олган ҳолда гармоник тўлқин юкланиши таъсирида бўлган цилиндрсимон кўндаланг кесимли иншоотларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини баҳолаш услублари тўла тадқиқ этилмаган. Қовушоқ-эластик муҳитда жойлашган ер ости цилиндрик иншоотларда ҳосил бўладиган

тўлқин дифракцияси хусусиятларини тадқиқ этиш услублари етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Бухоро муҳандислик-технология институти илмий тадқиқот режаси ва Ф4-14 рақамли «Суюқлик оқувчи ер ости эгри чизикли қувурнинг ташқи кучлари таъсиридаги кучланиш-деформация ҳолатини тадқиқ қилиш назариясини ривожлантириш ва ҳисоблаш усулларини ишлаб чиқиш» (2012-2016) мавзусидаги фундаментал илмий лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади динамик юкланиш таъсирида бўлган қовушоқ-эластик муҳит билан контактда бўлган доирасмон кўндаланг кесим юзали цилиндрик иншоотларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини баҳолашга қаратилган алгоритмни ишлаб чиқиш ва ҳисоблаш усулларини такомиллаштиришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

гармоник тўлқинлар таъсири остида қовушоқ-эластик муҳит билан контактда бўлган фазовий цилиндрик қобикнинг динамик кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати масаласини ечиш методикаси ҳамда алгоритминини ишлаб чиқиш;

қовушоқ-эластик муҳит билан контактда бўлган цилиндрик қобикнинг хос тебранишлари комплекс частоталари ва формаларини топиш методикаси ҳамда алгоритми ишлаб чиқиш;

танланган объектнинг геометрик ўлчовлари ва тўлқин параметрлари орасидаги боғланишларни таҳлил қилиш ва баҳолаш;

тебраниш частотасининг муҳит қовушоқлигига боғлиқлик даражасини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида қовушоқ-эластик муҳит билан тўлиқ контактда бўлган кўндаланг кесим юзалари айланасимон қобиклар (ёки туннеллар) олинган.

Тадқиқотнинг предметини гармоник (ёки нотурғун) тўлқинлар таъсирида деформацияланувчан қовушоқ-эластик муҳит билан контактда бўлган цилиндрик қобикларнинг материалларнинг қовушоқлик хоссаларини эътиборга олган ҳолда кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати ва динамик характеристикаларини аниқлаш жараёнларини ташкил қилади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида деформацияланувчан қаттиқ жисмлар механикаси ва қурилиш механикаси усуллари, ҳисоблаш математикаси, математик моделлаштириш, дастурлаш усуллари, хусусий ҳосилалари дифференциал тенгламаларни ечиш учун “музлатиш”, ўзгарувчиларни ажратиш, Гаусс ва Лаплас усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

деформацияланувчан муҳитда жойлашган цилиндрик қобикқа бўйлама ва кўндаланг тўлқинлар юкланганда ҳосил бўладиган кучланиш-

деформация ҳолатини, хос тебранишлар комплекс частоталари ва формаларини материалларнинг қовушоқлик хоссаларини ҳисобга олган ҳолда аниқлаш методикаси ва алгоритми ишлаб чиқилган;

тўлқин узунлигининг $0.24 \leq D/\lambda \leq 0.42$ оралиғида цилиндрик қобикқа тушадиган максимал динамик босим статик босимдан 12%-15% кўп бўлиши, $0.42 \leq D/\lambda < 1$ шартда эса цилиндрик қобикқа тушадиган максимал динамик босим камайиб статик босимга яқинлашиб бориши топилган;

муҳитнинг инерцияси ҳисобга олинмаса (Винклер асоси) биринчи частотанинг қиймати 20% гача, иккинчи частотанинг қиймати 5-10% гача ошиши, ҳамда учинчи частотанинг қиймати амалда ўзгармаслиги аниқланган;

максимал нормал кучланишлар концентрацияси узун тўлқинлар соҳасида сирпанувчи контактда тўлиқ контактга қараганда 20% гача кўп бўлиши, уринма кучланиш эса тўлқин сонига нисбатан номонотон ўзгариши топилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

гармоник (ёки нотурғун) юкланишлар таъсирида бўлган деформацияланувчан муҳитда жойлашган кўп қатламли цилиндрик қобикларда ҳосил бўладиган кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ўрганишда юкланиш турига қараб баҳо берилган;

сейсмик (ёки нотурғун) кучлар таъсирида ҳосил бўладиган кучланишларнинг максимал қийматлари пайдо бўладиган соҳалар аниқланган;

бўйлама ва кўндаланг тўлқинлар таъсири остида деформацияланувчан муҳитда жойлашган цилиндрик қобик чегарасидаги (контуридаги) кучланишлар тақсимоли ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Чегаравий шартларнинг коррект қўйилиши, келтириб чиқарилган математик ифодаларнинг қатъийлиги, асосланган ечиш усулларида тизимли фойдаланилганлиги, ечимларнинг аниқлилигини баҳолашда бошқа тадқиқотчилар ечимлари билан таққосланганлиги ва уларнинг натижаларига мос тушганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти деформацияланувчан муҳит билан контактда бўлган кўндаланг кесим юзалари айланасимон қобикларда ва жисмларда тўлқин динамикаси ва дифракцияси назариясининг ривожланишига салмоқли ҳисса қўшиш ҳамда такомиллаштириш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти гармоник юкланишлар таъсирида деформацияланувчан муҳит билан контактда бўлган цилиндрик қобикларда кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини баҳолашнинг янги қонуниятларини ўрганиш имконини бериши ҳамда ишлаб чиқилган усул ва ҳисоблаш алгоритмлари ер ости иншоотларининг дифракция ва тебраниш масалаларини ечишга ва тадқиқ қилишга хизмат қилиши билан

изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.

Тадқиқотдаги динамик кучлар таъсирида эластик ва қовушоқ-эластик муҳитларда жойлашган цилиндрик қобикларнинг динамик кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблаш усуллари алгоритм бўйича олинган натижалар асосида:

интегро–дифференциал тенгламаларда релаксация ядроларни топишда (тескари масала) классик ядролардан фойдаланиб, аналитик ечиш усуллари ёрдамида топилган ядроларни солиштиришда Бухоро давлат университетида 2017-2020 йилларда бажарилган ОТ-Ф4–02–«Математик физиканинг ҳолатлар тўплами чексиз бўлган моделлари термодинамикаси» (2022 йил 26 августдаги 01-04/01-1505- сонли маълумотнома) фундаментал лойиҳасида фойдаланилган. Натижада топилган релаксация ядроси ва классик ядро параметрлари орасидаги фарқ 15% дан ошмаслиги аниқланган; йирик қон томирлар деворларининг эластиклигини ва ўтказувчанлигини ҳисобга олган ҳолда гидродинамик қаршиликларни аниқлашда Урганч давлат университетида 2017-2020 йилларда бажарилган ОТ – Ф4–04(05) "Спектрал усулни матрицавий ночизикли эволюцион тенгламаларни ечишда татбиқлари; Юрак қон томир тизими биомеханикаси" мавзусидаги (2022 йил 19 августдаги 01-184/15-сонли маълумотнома) фундаментал лойиҳада фойдаланилган. Натижада бу комплекс катталиклардан иборат бўлган хос сонларнинг комплекс текисликда жойлашиши ва уларга мос келувчи хос векторларга баҳо бериш имконияти яратилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация иши натижалари 6 та халқаро ва 6 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 29 та илмий иш чоп этилган, шулардан 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 9 та мақолалар, жумладан 1 та республика ва 8 та хорижий журналларида нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 108 бетни ташкил қилади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

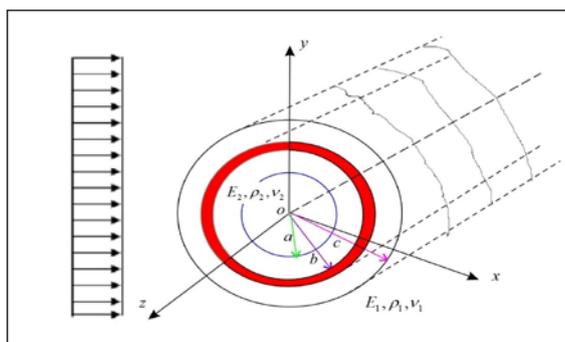
Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган, объекти ва предмети тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган ҳамда илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий

қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Қовушоқ-эластик муҳит билан контактда бўлган цилиндрик қобикнинг эркин ва мажбурий тебранишини ўрганишга бағишланган адабиётлар таҳлили**» деб номланган биринчи бобида муҳит билан боғланишда бўлган қовушоқ-эластик цилиндрик қобикқа гармоник тўлқинлар юкланиши натижасида ҳосил бўладиган динамик жараёнлар ҳолатини ўрганишга бағишланган адабиётларнинг қисқача таҳлили қилинган. Адабиётлар таҳлили асосида хулосалар қилинган. Тўлқин динамикасининг қўлланилаётган усуллари ва масалалари асосан цилиндрик қобик ва деформацияланувчи муҳитнинг тўлиқ контактда бўлган ҳолати учун ўрғанилган. Таҳлил натижалари шуни кўрсатадики, гармоник тўлқинлар иншоотларга таъсир қилганда мураккаб тўлқин майдонни ҳосил қилади, уни фақат тўлқин динамикасини усуллари билан ўрганиш мақсадга мувофиқ эканлиги кўрсатилган. Бир қатор ҳолларда, муҳит билан боғланишда иншоотларга гармоник тўлқин таъсирларида ҳосил бўладиган резонанс ҳолатларни ҳисоблашда муҳитнинг қовушоқ-эластиклик хусусиятларини ҳисобга олмаслик катта хатоликларга олиб келиши мумкинлиги кўрсатиб берилган.

Диссертациянинг «**Деформацияланувчи муҳит билан контактда бўлган қовушоқ-эластик цилиндрик қобикнинг эркин ва мажбурий тебраниш масалаларини қўйилиши, ечиш методикаси ва алгоритми**» деб номланган иккинчи бобида гармоник тўлқинларни цилиндрик шаклдаги қобикларга юкланиши масаласи ўрганилади. Бу боб икки параграфдан иборат бўлиб, биринчи параграфда масалани умумий қўйилиши ва асосий муносабатлар келтирилган. Иккинчи параграфда эса муҳит билан контактда бўлган қовушоқ-эластик цилиндрик қобикқа гармоник тўлқинлар таъсири масаласини ечиш методикаси ва алгоритми келтирилган. Фараз қилайлик чексиз муҳитда қалинлиги h бўлган цилиндрик қобик берилган бўлсин (1-расм). Муҳитнинг физик-механик параметрлари E_1, ν_1, ρ_1 ва цилиндрик қобикнинг параметрлари эса E_2, ν_2, ρ_2 бўлсин. Қўйилган масалада цилиндрик қобик z ўқи бўйича узун бўлсин. Масала эластиклик назариясининг текис деформация ҳолати масаласига олиб келинади. У ҳолда z ўқи йўналишида қобикнинг деформациясини нольга тенг деб эластиклик назариясининг Ламе тенгламасини содда кўринишга олиб келамиз

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



1-расм. Деформацияланувчи муҳит билан контактда бўлган цилиндрик қобикдаги тўлқин юкланиши масаланинг ҳисоб схемаси
 бунда $\tilde{\lambda}_j, \tilde{\mu}_j$ ва \tilde{E}_k оператор кўринишдаги эластиклик модуллари

$$\begin{aligned}\tilde{\lambda}_j f(t) &= \lambda_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\lambda}^{(i)}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \\ \tilde{\mu}_j f(t) &= \mu_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\mu}^{(i)}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right]; \\ \tilde{E} f(t) &= E_{01} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_E(t-\tau) f(\tau) d\tau \right],\end{aligned}$$

$f(t)$ —ихтиёрый узлуксиз функция; $R_E^{(i)}(t-\tau)$, $R_{\mu}^{(i)}(t-\tau)$ ва $R_{\lambda}^{(i)}(t-\tau)$ - релаксация ядроси; λ_{0j}, μ_{0j} - қатламнинг ёпишоқлик назарясидаги оний эластиклик модули, E_{01} - қобикнинг оний эластиклик модули. Ишда муҳит ва қаттиқ жисм контактида икки хил контакт шарти бажариладиган ҳолатлар, яъни сирпанувчи контакт бажариладиган ҳолни, қаттиқ маҳкамланганлик ва муҳит билан массасиз элементлар орқали контактда бўлган ҳолат шартлари бажарилганда механик системанинг динамик хусусиятлари ўрганилган.

Агар цилиндрик жисм қатламлардан ташкил топган бўлса, у ҳолда унинг ҳаракат тенгламалари (1) кўринишда бўлади. Қатламлар орасида қаттиқ маҳкамланганлик шарти қўйилади:

$$\begin{aligned}r = a_k : \quad \sigma_{rrk} &= \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)}; \quad \sigma_{rz k} = \sigma_{rz(k+1)}; \\ u_k &= u_{k+1}; \quad \mathcal{G}_k = \mathcal{G}_{k+1}; \quad w_k = w_{k+1}.\end{aligned}\tag{2}$$

Қатламлар орасида сирпанувчанлик шарти (қатламлар орасида қаршилик бўлмаса) қўйилади:

$$\begin{aligned}r = a_k : \quad \sigma_{rrk} &= \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{rz k} = 0; \\ \sigma_{r\theta(k+1)} &= \sigma_{rz(k+1)} = 0; \quad w_k = w_{k+1}.\end{aligned}\tag{3}$$

Қатламлар орасида қаршилик ҳисобга олинса, у ҳолда:

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

Агар $r = a_1$ биринчи қатлам суюқликсиз бўлса, у ҳолда кучланишлардан озод бўлиш шарти қўйилади:

$$r = a_k : \sigma_{rrN} = 0; \sigma_{r\theta N} = 0; \sigma_{rzN} = 0. \quad (4)$$

Қатламлар орасида массасиз элемент қўйилган бўлса, у ҳолда чегаравий (контакт) шарти текис деформация ҳолати масаласи учун қуйидагича бўлади:

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

Агар иншоотдан радиал координата чекчизликка интилса, у ҳолда бўйлама ва кўндаланг тўлқин потенциали Зоммерфельднинг ютилиш шартини қаннотлантиради:

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

Ярим текислик ёки чексиз қовушоқ-эластик муҳит таъсири ёки берадиган босими тақрибий усуллар билан ҳам ҳисобга олиш мумкинлиги кўп ишларда келтирилган. Фараз қилайлик иншоот муҳитга массасиз деформацияланувчи элементлар (инерциясиз элемент) билан контаклда бўлсин. Буни Винклер асоси ҳам дейилади. Цилиндрик қувур учун цилиндрик координаталар системасида қуйидагича бўлади

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k; \quad q_{1\theta}^k = 0, \quad (6)$$

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

k_{r0}^k - оний постели коэффициенти, $R_k(t-\tau)$ - релаксация ядроси. Агар Винклер асоси олинганда (6) дан фойдаланилганда асосни инерция кучини ҳам ҳисобга олганда қуйидагича аниқланади

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k - m_f \ddot{w}^k, \quad (7)$$

бунда m_f -асоснинг самарали массаси. Агар муҳитнинг қувурга берадиган таъсири Пастернак модели бўйича ҳисобга олинса, у ҳолда

$$q_r^k = -\tilde{k}_{r1}^k w^k - \tilde{t}_f \Delta w^k, \quad (8)$$

бунда \tilde{t}_f -оний силжишнинг оператор коэффициенти, \tilde{k}_{r1}^k -сиқилишнинг оператор коэффициенти.

Муҳитда таркалаётган цилиндрик ва текис тўлқинлар текис деформация ҳолати учун қуйидагича бўлади:

$$1. \varphi_{N+1}^{(i)} = A e^{i(\alpha_{N+1}x - \omega t)}, \psi_{N+1}^{(i)} = 0; \quad 2. \psi_{N+1}^{(i)} = A e^{i(\beta_{1+N}x - \omega t)}, \varphi_{N+1}^{(i)} = 0; \quad 3. \varphi_{N+1}^{(i)} = \varphi_{(N+1)0} i \pi H_o^{(1)}(\alpha_{N+1} \bar{r}) e^{-i\omega t},$$

бунда α_{N+1} - тўлқин сони, ω - тўлқин частотаси, $A, \varphi_{(N+1)0}$ - тушувчи тўлқин амплитудаси.

Охирги олинган тенгламадаги кўчиш векторини потенциалли ва соленоидли кўринишда тасвирласак, у ҳолда қатламларнинг кўчиши

қуйидаги кўринишда бўлади:

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

Асосий масалалар эластиклик назариясининг фазовий деформация ҳолати масаласига олиб келинади. Фазовий ҳолат учун $\vec{\psi}_j(\psi_{zj}, \psi_{rj}, \psi_{\theta j})$ бўйлама ва кўндаланг тўлқин потенциаллари қуйидаги интегро дифференциал тенгламаларни қаноотлантиради

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi_j - \int_{-\infty}^t R_E^{(j)}(t-\tau) \nabla^2 \phi_j d\tau &= \frac{1}{C_{p0j}^2} \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \vec{\psi}_j - \int_{-\infty}^t R_\mu^{(j)}(t-\tau) \nabla^2 \vec{\psi}_j d\tau = \frac{1}{C_{s0j}^2} \frac{\partial^2 \vec{\psi}_j}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \psi_{\theta j} - \frac{\psi_{\theta j}}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{rj}}{\partial \theta} - \int_{-\infty}^t R_E^{(j)}(t-\tau) M_{1\psi j}(\tau) d\tau - \frac{1}{c_{s0j}^2} \frac{\partial^2 \psi_{\theta j}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \psi_{rj} - \frac{\psi_{rj}}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{\theta j}}{\partial \theta} - \int_{-\infty}^t R_E^{(j)}(t-\tau) M_{2\psi j}(\tau) d\tau - \frac{1}{c_{s0j}^2} \frac{\partial^2 \psi_{rj}}{\partial t^2} &= 0, \quad (10) \\ M_{1\psi j}(\tau) = \nabla^2 \psi_{\theta j} - \frac{\psi_{\theta j}}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{rj}}{\partial \theta}, \quad M_{2\psi j}(\tau) = \nabla^2 \psi_{rj} - \frac{\psi_{rj}}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{\theta j}}{\partial \theta}. \end{aligned}$$

бунда $\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ -цилиндрик координаталар системасидаги дифференциал оператор ва ν_j -Пуассон коэффициентли. Юқорида келтирилган (10) тенгламалар системасининг ечими қуйидагича изланади:

$$\begin{aligned} \phi_j(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \phi_{jn}(\alpha_j r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pj} z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{rj}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{rjn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ -\cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pj} z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{\theta j}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{\theta jn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pj} z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{zj}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{zjn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ \cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_{pj} z} e^{-i\omega t}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\alpha_j^2 = \frac{\bar{\Omega}_j^2}{\gamma_j^2} - \gamma_p^2, \quad \beta_j^2 = \bar{\Omega}_j^2 - \gamma_p^2, \quad \bar{\Omega}_j = \frac{\omega \alpha_j}{c_{s0j} \Gamma_j}, \quad \gamma_j^2 = \frac{2(1-\nu_{0j}) \Gamma_{\lambda\mu j}}{1-2\nu_{0j}}.$$

бу ерда n -бутун сон, γ_{pk} -тўлқин тарқалишининг доимий сони, ω - комплекс хусусий частота, $r = r_1 / a_0$, $z = z_1 / a_0$. Ҳар бир компонента учун чексизликда ($r \rightarrow \infty$) Зоммерфельд шартлари қўйилади. (10) га (11) қўйилса қуйидаги комплекс коэффициентли оддий дифференциал тенгламалар системасини оламиз

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \phi_j}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\phi_j}{dr} + \left(\alpha_j^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \phi_j &= 0; \\ \frac{d^2 \psi_{zj}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{zj}}{dr} + \left(\beta_j^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \psi_{zj} &= 0; \\ \frac{d^2 \psi_{\theta j}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{\theta j}}{dr} + \frac{1}{r^2} \left(-n^2 \psi_{\theta j} + 2n\psi_{rj} - \psi_{rj} \right) \beta_j^2 \psi_{\theta j} &= 0; \\ \frac{d^2 \psi_{rj}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{rj}}{dr} + \frac{1}{r^2} \left(-n^2 \psi_{rj} + 2n\psi_{\theta j} - \psi_{\theta j} \right) \beta_j^2 \psi_{rj} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Юқорида келтирилган (12) дифференциал тенгламалар системасининг биринчи ва икинчи тенгламаси Бессел тенгламаси бўлиб, цилиндрик қатлам ва уни ўраб турувчи муҳит учун ечими куйидагича Бессел ва Нейман ёки Ханкел функциялари орқали ифодаланади

$$\phi_{nj}(r) = \begin{cases} F_{nj} J_n(\alpha_j r) + E_{nj} N_n(\alpha_j r), & j = N-1 \\ F'_{nj} H_n^{(1)}(\alpha_j r) + E'_{nk} H_n^{(2)}(\alpha_j r), & j = N; \end{cases} \quad \psi_{zj}(r) = \begin{cases} M_{1nj} J_n(\beta_j r) + L_{1nj} N_n(\beta_j r), & j = N-1; \\ M'_{1nj} H_n^{(1)}(\beta_j r) + L'_{1nj} H_n^{(2)}(\beta_j r), & j = N, \end{cases}$$

бунда $J_n(\alpha_j r)$ -н-чи тартибли Бессел функцияси, $N_n(\alpha_j r)$ -н-чи тартибли Нейман функцияси, $H_n^{(1)}(\beta_k r)$ -н-чи тартибли бир жинсли Ханкел функцияси, $H_n^{(2)}(\beta_k r)$ -н-чи тартибли икки жинсли Ханкел функцияси. Ихтиёрий интеграл доимийлари чегаравий ёки контакт шартларидан топилади. Уларни топиш учун комплекс коэффициентли бир жинсли бўлмаган алгебраик тенгламалар системасини оламиз

$$[C(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)]\{q\} = \{P\}, \quad (13)$$

бунда $\{q\}$ -устун вектор бўлиб ихтиёрий ўзгармаслардан ташкил топган. Қовушоқ эластик муҳитдаги фазовий цилиндрик жисмни эркин тебранишлар масаласи кўрилса, у ҳолда (13) комплекс коэффициентли алгебраик тенгламалар системасининг ўнг томони ноль бўлади. У ҳолда бир жинсли комплекс коэффициентли алгебраик тенгламалар системасини оламиз

$[C(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)]\{q\} = \{0\}$,. Тенгламалар системаси ечимга эга бўлиши учун асосий аниқловчи ($[C(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j)] = 0$) ноль бўлиши керак. Бу тенглама комплекс параметрли трансцендент тенгламани ифодалайди. Тенгламанинг илдизлари ўрганилаётган механик системани тебранишлар частотасини ифодалайди. Бу тенгламани фақат сонли усулда ечилади (Мюллер усул қўлланилган). Турғун бўлмаган тўлқин юкланиши (ва дифракцияси) масалаларини ечишда интеграл алмаштиришлар (Фурье ва Лаплас), Гаусс, Ромберг ва Мюллер усуллари асосида алгоритм ишлаб чиқилган.

Диссертациянинг «**Қовушоқ эластик муҳит билан контакда бўлган цилиндрик қобикқа тўлқиннинг юкланиши ва резонанс ҳолати**» деб номланган учинчи бобида гармоник тўлқинлар таъсирида қовушоқ-эластик фазода жойлашган муҳит билан турли хил контактда бўлган цилиндрик қобикнинг динамик кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати масаласи кўриб чиқилган. Тадқиқотнинг асосий мақсади-гармоник тўлқинлар таъсирида цилиндрик қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини кўрсаткичларга боғлиқ ҳолда тадқиқ этиш усули ва алгоритмини ишлаб чиқишни кўзда тутди.

Фараз қилайлик чексиз узун цилиндрик қобик муҳит билан боғланишда бўлсин. Қовушоқ-эластик муҳитда цилиндрик жисм ёки қобик жойлашган бўлсин. Цилиндрик қобикни ўраб турувчи муҳит қовушоқ-эластик, изотроп ва бир жинсли бўлсин. Бу муҳитда бўйлама (ёки кўндаланг) тўлқинлар

тарқалсин. Тўлқинлар қобикқа келиб тушса тўлқин юкланиши ҳосил бўлади. Бу юкланиш фронти қобик ўкига параллел бўлсин. Кўриладиган масала қовушоқ эластиклик назарясининг текис деформация ҳолати масаласига олиб келинади. Цилиндрик қобикнинг ташқи радиуси $r = R$ ва ички радиуси $r = R_0$ бўлсин. Бу параграфнинг асосий мақсади цилиндрик қобикқа бўйлама (ёки кўндаланг) тўлқин юкланиши остидаги муҳитдаги ва цилиндрик қобикдаги кучланишлар-деформация ҳолатини аниқлашдан иборат. Текис деформация ҳолатида бўлган цилиндрик жисм учун кўчишлар орқали ёзилган ҳаракат тенгламаси (1) -ни қаноотлантиради. Қатлам ва муҳитнинг контактида, яъни $r = R$ бўлганда қаттиқ маҳкамланганлик, яъни мос келувчи кўчиш ва кучланишларни тенглик шarti кўйилади.

Сонли натижалардан кўриниб турибдики бўйлама тўлқин таъсирида энг катта кучланишлар контактадаги радиал кучланишлар бўлиб, энг катта қийматини узун тўлқинлар соҳасида қабул қилар экан (2-расм). Агар қовушоқлик эътиборга олинса частотани ошкор кўринишда топиб бўлмайди. Уни фақат сонли усул ёрдамида топиш мумкин. MULLER усули асосида сонли ечилади. Материални қовушоқлигини ҳисобга олиш учун Ржаницын–Колтуновни уч параметирли кучсиз сингуляр ядроси

кўлланилади $R(t) = \frac{Ae^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}}$. Параметрлар қуйидаги кўринишда қабул қилинган $A = 0,048; \beta = 0,05; \alpha = 0,1, \nu_1 = \nu_2 = 0,14; h_0 = 0,025; \eta = 0,1$

Осесиметрик бўлмаган ҳол учун механик системани тебранишлар частотаси 1-жадвалда келтирилган ($A = 0$). Олинган натижалар бошқа олимлар натижалари билан солиштирилган. Натижалар 10% фарқ билан устма уст тушиши топилди

Жадвал -1.

Комплекс частотани тўлқин сони n га боғлиқ ўзгариши

n	Paо and Mow	Baron and Parnes	Диссертация усули
0	0.4474-i0.4420	0.44647-i0.44127	0.44893-i0.44281
1	1.09272-i0.7653	1.09272-i0.7653	1.09373-i0.76532
2	1.90754-i0.8978	1.90754-i0.8978	1.90774-i0.89791
3	2.75632-i0.9915	2.75652-i0.9915	2.75642-i0.99167
4	3.63132-i1.0666	3.63132-i1.0666	3.63138-i1.06672

Осесиметрик тебранишда комплекс частотани оний юнг модуллари нисбати бўйича ўзгариши (контактада сирпанувчанлик шarti) 2-жадвалда келтирилган.

Жадвал-2.

Осесиметрик тебранишда комплекс частотани оний юнг модулларини нисбати бўйича ўзгариши (контактда сирпанувчанлик шарти)

Ω	$E=0,2$	$E=0,4$	$E=0,6$	$E=0,8$	$E=1,0$
Ω_1	4,27953D-02	5,36234D-02	6,01305D-02	6,79341D-02	6,91938D-02
	-i6,34656D-03	-i6,52312D-03	-i6,76328D-03	-i6,21547D-03	-i6,14263D-03

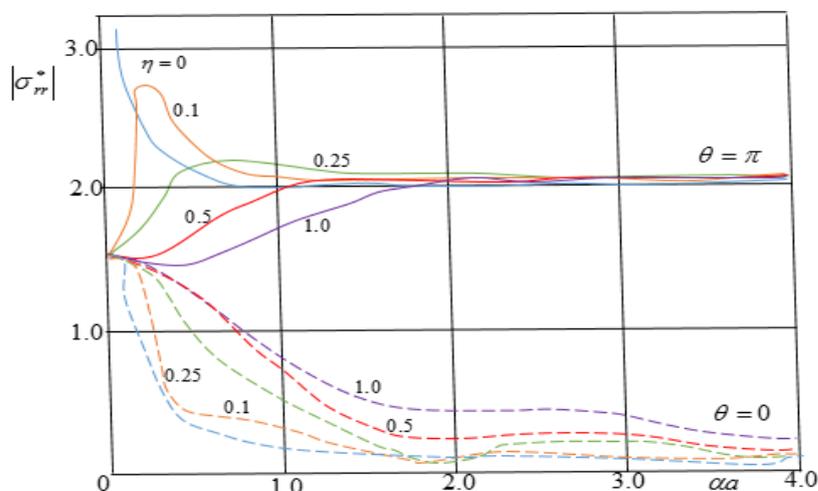
Таҳлилдан келиб чиқадики оний эластик модуллари нисбатининг ўзгариши хос частотанинг биринчи модасига таъсири сезиларли экан. Юқори частоталардаги таъсири жуда оз ёки ҳисобга олмаса ҳам бўладиган даражада экан. Хос сонларнинг ҳақиқий ва мавҳум қисмлари қаттиқ маҳкамланганлик ва сирпанувчанлик шартларида 15% гача фарқ қилиши топилди. Қобик қалинлигини ошириши ҳам хос сонларни ҳақиқий ва мавҳум қисмларини 20% гача ошириши мумкин экан.

Цилиндрик қобик идеал суюқлик билан тўлдирилган бўлсин. Бу механик системанинг хос тебранишлар частотасини ўрганамиз. Бу масалани ҳам эластиклик назариясининг текис деформация ҳолати масаласига олиб келиб ечамиз. Уларни ҳаракат тенгламалари биринчи бўлимда келтирилганидек, тўлқиннинг кўчиш потенциаллари орқали ифода қилинади. Хос частоталарини ўзгариши 3-жадвалда келтирилган.

Жадвал-3.

Комплекс частотани η га нисбатан ўзгариши

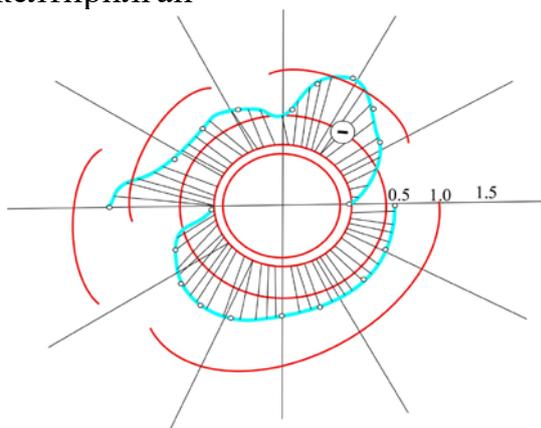
Ω	$\eta = 0.1$	$\eta = 0.3$	$\eta = 0.5$	$\eta = 0.6$
Ω_1	6.9061D-01	7.0032D-01	9.3200D-01	9.8173D-01
	-i1.2403D-02	-i1.5603D-02	-i1.7701D-01	-i1.9260D-01
Ω_2	1.11563D-00	1.3152D-00	1.5391D-00	1.7102D-00
	-i7.9125D-02	-i8.1334D-01	-i8.7370D-01	-j8.9389-01
Ω_3	1.7516D+00	1.9783D+00	2.1952D+00	2.3830D+00
	-i1.550D-01	-i3.3424D-01	-i5.484D-01	-i6.3971-01



2- расм. Кучланишлар амплитудасини тўлқин сонига нисбатан ўзгариши.

Жадвалдан келиб чиқадики, суюқлик зичлигини ошиши частотани ҳақиқий ва мавҳум қисмларини қийматини ошиб боришига сабаб бўлар экан. Зичликни қийматини ўсишини ифодаловчи η нинг 0.5 дан катта қийматларида, бу ўзгаришнинг таъсири кам бўлар экан.

Цилиндрик қобикқа ностационар юкланиш таъсирида ($q(r, \theta, z, t) = q_0 H(t)$) ҳосил бўлган кучланиш ва деформация ҳолатини топиш учун вақт бўйича Лаплас ва бурчак бўйича Фурье алмаштиришни қўллаймиз. Қувурнинг параметрлари куйидагича $D_1 = 0.75, D_2 = 1.0, h = 0.25$, бўлган пўлат қобик деб оламиз. Контур цилиндрик қобикнинг ички сиртидаги ($r=R$) контур кучланишлар ($t=1,8$ сек) эпюраси 3-расмда келтирилган



3-расм. Контур цилиндрик қобикнинг ички сиртидаги ($r=R$) контур кучланиши ($t=1,8$ сек)

Шундай қилиб учинчи бобда цилиндрик қобикнинг турли хил чегаравий шартлар бажарилганда эркин ва мажбурий тебраниш масалалари ечилди. Максимал кучланишлар узун тўлқинлар соҳасида тўлиқ контактга қараганда 25% гача ошиши топилган. Бу ерда θ_0 тўлқинни тушиш бурчаги. Бу ҳолатда ҳам текис тўлқинни таъсири ўрганилган.

Расмда узун тўлқинлар соҳасида олинган сонли натижалар келтирилган. Максимал кучланишлар узун тўлқинлар соҳасида максимал бўлиши ва статик кучланишлар ҳолатидан 20% гача кўп бўлиши топилган.

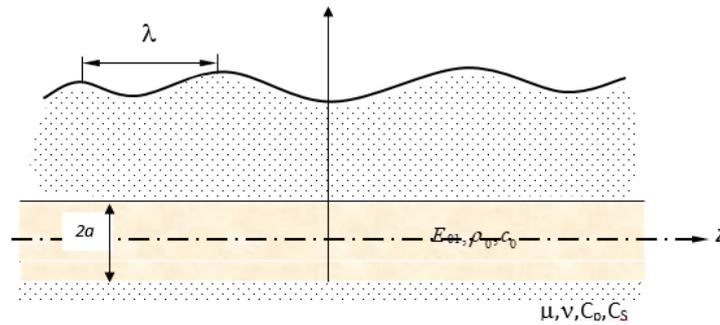
«Қовушоқ-эластик цилиндрик формадаги қувурларга гармоник сирт тўлқинларини юкланиши» деб номланган тўртинчи бобда гармоник тўлқиннинг қовушоқ-эластик цилиндрик жисмга юкланиши масаласи ўрганилади. Бу бобда гармоник (ёки гармоник бўлмаган) қовушоқ эластик муҳит сиртида тарқалувчи сирт (Рэлей) тўлқинининг цилиндрик қувурга юкланиши масаласи қўйилади ва динамик характеристикалари сонли таҳлил қилинади. У ҳолда стерженинг ҳаракат тенгламаси куйидагича бўлади

$$E_{0k} \Gamma_k \frac{\partial^2 U_p(z, t)}{\partial z^2} + \{2\sigma_{rz}(\Gamma_k, a, z, t) / a\} - \rho \frac{\partial^2 U_p(z, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (14)$$

бунда $\sigma_{rz}(a, z, t)$ силжиш кучланишини. Қувур ва муҳит контактида куйидаги шарт бажарилади $\mathcal{Q}_1(a, z, t) = U_c(a, z, t)$, ярим текислик сиртида Рэлей тўлқинидан ҳосил бўлган кучланиш қўйилади

$$(\sigma_{yy})_{y=h} = f_1(y, z, t); \quad (\sigma_{zy})_{y=h} = f_2(y, z, t)$$

Чексизликда Зоммерфельднинг ютилиш шартини қаноатлантиради.



4- расм. Ҳисоб схемаси

Стерженда z ўқи бўйича тўлқин тарқалишини ўрганамиз, интегро - дифференциал тенгламани ечими махсус функциялар (Бессел, Нейман ва Ханкел) ёрдамида ифодаланади. Агар чегаравий шартлардан фойдаланилса қуйидагича дисперсион тенгламани оламиз

$$(1 - \varepsilon^2) \left[H_0^{(1)}(\gamma_p) H_1^{(1)}(\gamma_s) + \left\{ \gamma_p \gamma_s (2\pi \eta)^2 \right\} H_0^{(1)}(\gamma_s) H_1^{(1)}(\gamma_p) \right] + (R_D \varepsilon^2 / \pi \eta) \left[(\varepsilon / R_S)^2 - 1 \right]^{1/2} H_1^{(1)}(\gamma_s) H_1^{(1)}(\gamma_p) = 0, \quad (15)$$

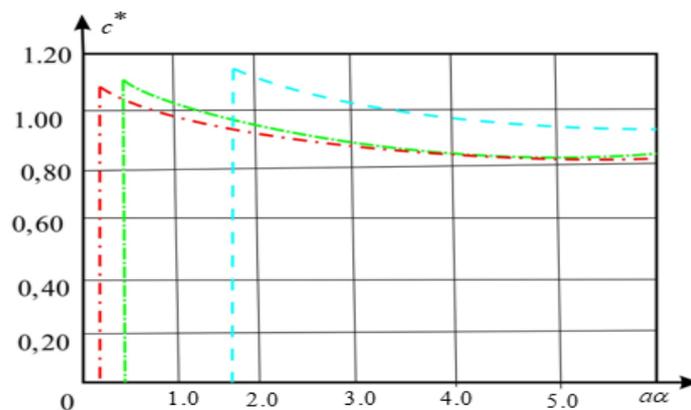
бунда $\varepsilon = c / \bar{c}$, $\eta = a / \lambda$, $R_c = c_p \Gamma_{1k} / \Gamma_{2k} c_S$; $R_v = c_p \Gamma_{1k} / \bar{c}$; $R_D = \rho / \bar{\rho}$.

Дисперсион тенглама (15) Мюллер усули асосида ечилди. Ҳисоблашларда муҳитнинг қовушоқлиги уч параметрли Колтунов-Ржаницын релаксация ядроси орқали топилган $R(t) = A e^{-\beta t} / t^{1-\alpha}$: $A = 0,048$; $\beta = 0,05$; $\alpha = 0,1$ Механик системани ифодаловчи параметрлар қуйидагича олинган:

$$\nu_c = 0.25, \Pi_v = c_{pc} / c_0 = 1.50,$$

$$\Pi_c = [2(1 - \nu_c) / (1 - 2\nu_c)]^{1/2}, \Pi_D = \rho_c / \rho_0.$$

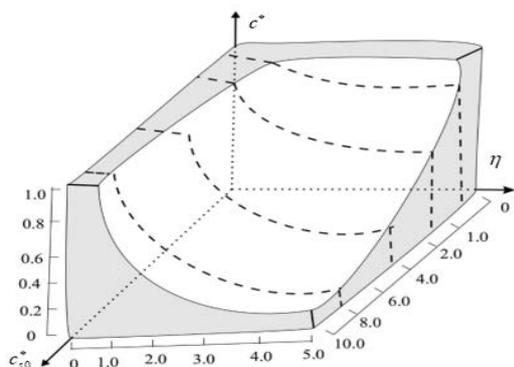
Фаза тезлигини сонли натижалари 5 ва 6 расмларда келтирилган. Стерженда эркин тўлқин тарқалиши учун, муҳитда бўлмаган стерженда бўйлама тўлқин тарқалиш тезлиги, муҳитда бўйлама тўлқин тарқалиш тезлигидан кичик бўлиши керак. Олинган натижалар грунтнинг мажбурий ҳаракатида стерженда параметрларга боғлиқ резонанс ҳодисаси рўй беришини аниқлашга имкон беради. Сонли ҳисоблашларда дисперция эгри чизиқлари (стержен учун) ва дисперсион сиртлар кўрилди.



5- расм. Фаза тезлигини ҳақиқий қисмини тўлқин сонига боғлиқлиги

$$\nu_c = 0.25, \Pi_v = c_{pc} / c_0 = 1.50.$$

Буларнинг таҳлили натижасида грунтда бўлган цилиндрик стерженнинг резонанс ҳодисасини бошқариш мумкин бўлади. Сонли ҳисоблаш натижасида фаза тезликлари тарқалишини («стержен-грунт» механик системасида) юқори ва қуйи чегаралари ўрнатилди. «стержен-грунт» системасида стационар шароитда эркин тўлқин тарқалиши учун $c_0 < c_s$ шарт бажарилиши керак.



б- расм. Фаза тезлиги ҳақиқий қисми дисперсия сиртини тўлқин сонига ва параметрларга боғлиқ ўзгариши $\nu_c = 0.25, \Pi_D = 0.90$

Агар $c_0 > c_s$ бўлса эркин тўлқин тарқалмайди, яъни дисперсион тенгламани ечими мавҳум каталик бўлади. Бу эса тез сўнадиган ёки гармоник бўлмаган тўлқинларни ифодалайди. Зичликлар нисбати ҳам эркин тўлқинлар тарқалишига ката таъсир кўрсатар экан. Стержен зичлиги ошиб бориши билан кучланиш ва кўчишлар камайиб, фаза тезлиги ошиб борар экан. Бу зичликлар нисбати 0.5 бўлганда сезиларли бўлади.

ХУЛОСА

«Қовушоқ – эластик муҳит билан контактда бўлган цилиндрик қобикнинг эркин ва мажбурий тебраниш хусусиятлари» мавзусидаги диссертация ишидан олинган натижалар асосида қуйидаги хулосаларга келинди:

1. Деформацияланувчи (қовушоқ-эластик) муҳитда жойлашган цилиндрик қобик муҳит билан турли хил контакт шартлари бажарилганда (боғланшда) бўйлама ва кўндаланг тўлқинлар юкланганда ҳосил бўладиган кучланиш ва деформация ҳолатини материалларни қовушоқлик хоссаларини ҳисобга олган ҳолда аниқлаш методикаси ва алгоритми ишлаб чиқилган. Ишлаб чиқилган методика математик физика фанининг махсус функциялар усули, Мюллер, Лаплас ва Гаусс усулари, ҳамда Грин - Лембнинг потенциалларига асосланган.

2. Қовушоқ-эластик муҳитда жойлашган фазовий цилиндрик қобикнинг муҳит билан турли хил контакт шартлари бажарилганда (боғланшда) хос тебранишлари масаласини материалнинг қовушоқлик хоссаларини ва тўлқинни сўнишни ҳисобга олган ҳолда математик масаланинг қўйилиши, ечиш услубиёти ва алгоритми ишлаб чиқилган.

3. Сонли натижалар таҳлилдан келиб чиқдики, тўлқин узунлигининг $0.24 \leq D/\lambda \leq 0.42$ оралиғида цилиндрик қобикқа тушадиган максимал динамик босим статик босимдан 12%-15% кўп бўлиши топилган. Агар $0.42 \leq D/\lambda < 1$ шарт бажарилса цилиндрик қобикқа тушадиган максимал динамик босим камайиб статик босимга яқинлашиб боради. Агар муҳитнинг

қовушоқлиги этиборга олинса максимал динамик босим $D/\lambda=0.9478$ бўлганда статик босимга тенглашади. Булардан ташқари ҳисоблашлардан келиб чиқадики, $0 < D/\lambda < 1$ бўлганда тўлқин дифракцияси ҳисобга олиш юкланишга бўлган таъсири кам бўлганлиги сабабли масалани квазистатика масаласига олиб келиб соддалаштириш мумкин бўлар экан. Агар $D/\lambda > 1$ бўлганда муҳитда жойлашган иншоотлар учун дифракция ҳолатини ҳисобга олиш керак бўлиши топилган.

4. Сейсмик тўлқиннинг қобикқа кўрсатадиган таъсири (ёки юкланиш) муҳитнинг (грунтнинг) зичлигига ва контакт қаршилиқ бикрлигига боғлиқ экан. Бу темир бетон қувур қалинлигини ўзгариши грунтнинг динамик босим коэффициентининг қийматига таъсири бўлмаслиги аниқланди.

5. Агар муҳитнинг инерцияси ҳисобга олинмаса (Винклер асоси) биринчи частотанинг қиймати 20% -гача, иккинчи частотанинг қиймати 5-10% - гача ошиши, ҳамда учинчи частотанинг қиймати амалда ўзгармаслиги аниқланди.

6. Қобикнинг нисбий қаттиқлигининг камайиши кучланишлар концентрациясини ҳам камайишига олиб келар экан. Максимал кучланишлар концентрацияси узун тўлқинлар соҳасида сирпанувчи контактда тўлиқ контактга қараганда 20% гача кўп бўлиши топилган. Узун тўлқинлар соҳасида қаттиқ маҳкамланган контактда уринма кучланиш тўлқин сонига нисбатан номанотон ўзгариши топилди.

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

БУХАРСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

АХМЕДОВ МАКСУД ШАРИПОВИЧ

**СВОЙСТВА СВОБОДНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, КОНТАКТИРУЮЩЕЙ С
ВЯЗКОУПРУГОЙ СРЕДОЙ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

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

Бухара – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована за В 2022.3. PhD/FM18 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан

Диссертация выполнена в Бухарском инженерно-технологическом институте.

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

Научный руководитель :	Тешаев Мухсин Худойбердиевич доктор физико-математических наук(DSc),
Официальные оппоненты:	Мавлонов Тўлқин Мавлонович доктор технических наук, профессор Исмаилов Кубаймурат доктор технических наук, профессор
Ведущая организация:	Ташкентский химико-технологический институт

Защита диссертации состоится «19» декабря 2022 г. в «14:00» часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2021.FM.101.02.03 при Бухарском инженерно-технологическом институте по адресу: 200100, г.Бухара, ул. К. Муртазаев, 15. Тел.: (+99865) 223-78-84; факс: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz.

Диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарского инженерно-технологического института (зарегистрирована под номером №404.). (Адрес:Бухарская область, 200100, г. Бухара, ул. К. Муртазаева, 15. Тел.: (+99895) 604-44-70).

Автореферат диссертации разослан «07»декабря 2022 года.
(протокол рассылки №3 от «19» ноября 2022 г.)

Н.Н. Садуллаев

Председатель научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор

З.И. Болтаев

Ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., (DSc)

М.З. Шарипов

Председатель научного семинара
при научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (автореферат диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире обеспечение сейсмостойкости подземных сооружений в сейсмически активных районах сегодня является одним из важнейших вопросов. Во избежание повреждений или разрушения тоннелей, трубопроводов и различных подземных сооружений под действием сейсмических волн требуется разработка методов исследования с учетом взаимосвязей в грунтовой среде и контактах сооружений, а также взаимодействия сейсмических сил с конструктивными элементами подземного сооружения.

В этой области в развитых зарубежных странах, в том числе в США, Франции, Японии, Италии, России, Китае, Турции и других, особое внимание уделяется разработке надежных методов расчета, обеспечивающих сейсмостойкость подземных сооружений, снижение в допустимых пределах динамических напряжений и деформаций, образующихся в туннельных конструкциях, распределение сумм напряжений в наименьших случаях.

В мире существуют различные модели подземных сооружений, приближенно учитывающие взаимосвязь деформируемой среды, особое значение имеют научные исследования, целью которых является разработка методов и программ расчета конкретных задач на основе таких моделей. В связи с этим возникает необходимость знания физических процессов, происходящих в процессе проектирования подземных труб, тоннелей в упругих или вязкоупругих полуплоскостях, а также напряжений, образующихся в туннельных покрытиях, а также характеристик неполного контакта между грунтовой средой и оболочкой. Вместе с тем актуальной проблемой является разработка методов и алгоритмов расчета напряженно-деформируемого состояния, образующегося в туннельных покрытиях, с учетом глубины заделки подземных сооружений и физико-механических свойств грунтовой среды. Следует также отметить, что при исследовании напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек, находящихся в полном контакте с вышеуказанной средой, одной из важнейших задач считается проведение целенаправленных научных исследований для выявления опасных напряжений.

В нашей Республике осуществляются широкомасштабные мероприятия по повышению сейсмической прочности подземных сооружений и обеспечению их сейсмической безопасности.

В Указе Президента Республики Узбекистан №УП-6097 «Об утверждении концепции развития науки до 2030 года» от 29 октября 2020 года определены задачи, в том числе "...определения приоритетных направлений непрерывного реформирования науки на перспективу, подготовки самостоятельно мыслящих высококвалифицированных кадров,

обладающих современными знаниями,...."². При выполнении этих задач, в том числе, одной из важных задач является создание и развитие методики расчета напряженно-деформируемого состояния и динамических свойств цилиндрической оболочки, контактирующей с окружающей средой.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит реализации задач, отраженных в Указе Президента Республики Узбекистан № ПФ-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», Постановлении №ПП-4794 «О мерах по коренному совершенствованию системы обеспечения сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан» от 30 июля 2020 года, Постановления №515 Кабинета Министров Республики Узбекистан «О дальнейшем совершенствовании государственной системы предупреждения и реагирования на чрезвычайные ситуации в Республике Узбекистан» от 26 августа 2020 года и в других нормативно-правовых документах, относительно данной сферы деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Математика, механика, сейсмодинамика конструкций и информатика» и XIV. «Сейсмология, сейсмическая безопасность зданий и сооружений и строительство».

Степень изученности проблемы. С научной точки зрения проблему динамической деформации цилиндрической оболочки и тел, находящихся в полном контакте с вязкоупругой средой под действием сейсмических волн, исследовали такие известные зарубежные ученые как Трояновский И.Е., Кийко И.А., Ильюшин А.А., Горшков А.Г., Шемякин Е.И., Гузь А.Н., Булычев Н.С., Фотиева Н.Н., Ержанов Ж.С., Айталиев Ш.М., Дорман И.Я., Оганесов Г.И., Балсон Ф.С., Гринченко В.Т., Молотков Л.А., Новичков Ю.И., Петрашень Г.И., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Старовойтов Э.И., Кольский Г., Davis R.M., Wayt J.A., Miker T., Maytsler A., Ahenbah J.D., Shafer V.V., San R.I. и другие.

Ученые нашей республики как Рахматулин Х.А., Урозбоев М.Т., Кабулов В.К., Рашидов Т.Р., Ширинкулов Т.Ш., Хожметов Г.Х., Ишанходжаев А.А., Мубораков Я.Н., Буриев Т., Мирсаидов М.М., Мардонов Б.М., Султонов К.С., Маматкулов Ш.М., Бадалов Ф.Б., Мирзаев И., Мавлонов Т.М., Юлдашев Ш.С., Абдусатторов А., Сагдиев Х., Сафаров И.И., Тешаев М.Х., Абдукодиров С., Худойназаров Х., Бкриев А.Т., Усаров М.К. и многие другие специалисты достигли значительных результатов в разработке методов расчета задач волновой нагрузки на тела пластинчатой, цилиндрической или сферической формы, находящиеся в контакте со средой, по изучению и оценке напряженно-деформируемых состояний подземных сооружений. Однако не до конца исследованы методы оценки

² Указ Президента республики Узбекистан №УП-6097 от 29 октября 2020 г. «Об утверждении концепции развития науки до 2030 года»

напряженно-деформируемого состояния конструкций цилиндрического поперечного сечения под действием гармонической волновой нагрузки с учетом вязкостных свойств среды, а также состояния в полном контакте с цилиндрическим телом. Кроме того, недостаточно изучены методы исследования свойств дифракции волн, образующихся в подземных цилиндрических структурах, расположенных в вязкоупругих средах.

Связь диссертации с научно–исследовательскими работами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательского плана Бухарского инженерно-технологического института и фундаментального научного проекта № Ф4-14 «Развитие теории исследования напряженно-деформационного состояния под действием внешних сил подземного криволинейного трубопровода, по которому течет жидкость и разработка методов расчета» (2012-2016).

Целью исследования является разработка вычислительного метода и алгоритма, направленного на оценку напряженно-деформированного состояния цилиндрических конструкций с круговыми поперечными сечениями поверхностей, находящихся в полном контакте с вязкоупругой средой под действием динамических нагрузок, совершенствование аналитических и численных методов расчета.

Задачи исследования:

разработка и сравнительная оценка методики и алгоритма решения задачи о динамическом напряженно-деформированном состоянии пространственной цилиндрической оболочки, находящейся в контакте с вязкоупругой средой под действием гармонических (или нестабильных) волн;

разработка методики и алгоритма нахождения комплексных частот и форм характерных колебаний цилиндрической оболочки находящейся в контакте с вязкоупругой средой;

сравнительная оценка состояния динамического напряжения–деформации, возникающего при воздействии нестабильной нагрузки на пространственную цилиндрическую оболочку;

оценка влияния вязкости цилиндрической оболочки и окружающей ее среды в динамическом напряженно–деформированном состоянии.

В качестве объекта исследования были взяты круглые оболочки (или туннели) поперечных сечений поверхностей, находящихся в полном контакте с вязкоупругой средой.

Предмет исследования составляют процессы определения напряженно-деформируемых состояний и динамических характеристик цилиндрических оболочек, находящихся в контакте с деформируемой вязкоупругой средой под действием гармонических (или неустойчивых) волн, с учетом вязкостных свойств материалов.

Методы исследования. В ходе исследования были использованы методы механики деформируемых твердых тел и строительной механики,

методы вычислительной математики, математического моделирования, программирования, “замораживания” для решения частных производных дифференциальных уравнений, разделения переменных, методы Гаусса и Лапласа.

Научная новизна исследования состоит из следующих:

разработана методика и алгоритм определения напряжённо-деформированного состояния, комплексных частот и форм собственных колебаний, которые образуются при нагружении продольными и поперечными волнами цилиндрической оболочки, находящейся в деформируемой среде, с учетом вязкоупругих свойств материалов;

обнаружено, что в диапазоне длин волн $0.24 \leq D/\lambda \leq 0.42$ максимальное динамическое давление, которое падает на цилиндрическую оболочку, на 12% -15% больше, чем статическое давление, а при $0.42 \leq D/\lambda < 1$ состоянии уменьшается и приближается к статическому давлению;

установлено, что если не учитывать инерцию среды (основание Винклера), то значение первой частоты увеличивается до 20%, значение второй частоты до 5-10%, а третьей частоты практически не меняется;

обнаружено, что в области длинных волн концентрация максимальных нормальных напряжений на 20% выше при жёстком контакте чем скользящем контакте, в то время как касательные напряжения немоноотонна изменяются относительно волнового числа.

Практические результаты исследования состоят из следующих:

осуществлена оценка по типу нагрузки при исследовании состояния напряженно-деформируемости, образующегося в многослойных цилиндрических оболочках (туннелях), находящихся в деформируемой среде под действием гармонических (или неустойчивых) нагрузок;

определены области, в которых возникают максимальные значения напряжений, образующихся в укрепленных полостях (тоннелях) под действием сейсмических сил

разработано распределение напряжений на границе (контуре) армированных полостей (тоннелей), расположенных в деформируемой среде под действием продольных и поперечных волн.

Достоверность результатов исследования объясняется корректной постановкой пограничных условий, строгостью приведенных математических выражений, систематическим использованием обоснованных методов решения, сопоставлением их с решениями других исследователей при оценке точности решений и соответствием их результатов, а также внедренностью их в практику.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования объясняется значительным вкладом в развитие и совершенствованием теории волновой динамики и дифракции в оболочках и телах с закругленными поверхностями поперечного сечения, находящихся в полном контакте с деформируемой средой.

Практическая значимость результатов исследований объясняется тем, что они позволяют изучить новые закономерности оценки напряженно-деформированного состояния в цилиндрических оболочках (тоннелях и трубопроводах), находящихся в полном контакте со средой, находящейся в деформируемой среде под действием гармонических нагрузок, а разработанные методика и алгоритмы расчета служат для решения и исследования задач дифракции и вибрации подземных сооружений.

Внедренность результатов исследования. Научные результаты, полученные в исследовательской работе на основе методов расчета динамического напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек, находящихся в упругих и вязкоупругих средах под действием динамических сил:

использование классических ядер для нахождения релаксационных ядер в интегро–дифференциальных уравнениях (обратная задача) сравнение ядер, найденных аналитическими методами решения использованы в фундаментальном проекте № ОТ-Ф4–02 “Термодинамика моделей математической физики с бесконечным набором состояний” выполненного в 2017-2020 годах в Бухарском государственном университете (Справка № 01-04/01-1505 от 26 августа 2022 года). В результате использования результатов научной работы было установлено, что разница между найденными параметрами релаксационного ядра и классического ядра не превышает 15%. С помощью различных стандартных ядер, предложенных в диссертации, была создана возможность определения корреляционных связей между параметрами ядра.

Научные результаты, методы и материалы диссертационной работы были использованы в научном проекте фундаментальных исследований № ОТ – Ф4–04(05) по теме “Применение спектрального метода к решению матричных нелинейных эволюционных уравнений; биомеханика сердечно-сосудистой системы” выполненных в 2017-2020 годы в Ургенчском государственном университете (справка №01-184/15 от 19 августа 2022 года). Они использовались для доказательства полной интегрируемости нелинейной общей Голд–цепи с адаптированным источником; для вывода алгоритма построения решения задачи Коши для уравнения Кортевега-де Фриза с адаптированным пороговым источником с нагрузкой Хэдли и для нахождения численных значений для примеров в некоторых частных случаях; для определения гидродинамических сопротивлений с учетом эластичности и проницаемости стенок крупных кровеносных сосудов. В результате это позволило расположить соответствующие числа, состоящие из комплексных величин, на комплексной плоскости и оценить соответствующие им собственные векторы.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования обсуждены на 6 международных и 6 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. Всего по теме

диссертации опубликовано 29 научных работ, из них 9 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной комиссией Республики Узбекистан к публикации основных научных результатов диссертации доктора философии (PhD), в том числе 1-в республиканском и 8 в зарубежных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **вводной части** обоснована актуальность и необходимость проведенных исследований, сформулированы цели и задачи исследования, описаны объект и предмет исследования, указано соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов и раскрыта их научно-практическая значимость, приведены сведения о внедренности результатов исследования в практику, опубликованных работах и структуре диссертации.

Первая глава диссертации называется **«Анализ литературы, посвященной изучению свободных и вынужденных колебаний цилиндрической оболочки при контакте с вязкоупругой средой»**. В данной главе представлен краткий анализ литературы, посвященной изучению состояния динамических процессов, вызванных нагрузкой гармонических волн на вязкоупругую цилиндрическую оболочку, находящуюся в контакте со средой. На основе анализа литературы получены соответствующие выводы. Применяемые методы и вопросы волновой динамики в основном изучались для цилиндрической оболочки и полностью контактирующего состояния деформируемой среды.

Результаты анализа показывают, что при воздействии гармонических волн на конструкции образуется сложное волновое поле, изучение которого целесообразно только методами волновой динамики. В ряде случаев показано, что игнорирование вязкоупругих свойств среды может привести к большим ошибкам при расчете резонансных состояний, образующихся при воздействии гармонических волн на конструкции при контакте со средой.

Вторая глава диссертации называется **“Постановка, методика и алгоритм решения задач о свободных и вынужденных колебаниях вязкоупругой цилиндрической оболочки при контакте с деформируемой средой»**. В данной главе рассмотрен вопрос о нагрузке гармонических волн на оболочки цилиндрической формы. Глава состоит из двух параграфов, первый из которых содержит общую постановку вопроса и основные отношения. А во втором параграфе представлена методика и алгоритм решения задачи о влиянии гармонических волн на вязкоупругую цилиндрическую оболочку, находящуюся в контакте со средой

Предположим, что в бесконечной среде дана цилиндрическая оболочка толщиной h (рис.1). Допустим физико-механические параметры среды E_1, ν_1, ρ_1 , а-параметры цилиндрической оболочки E_2, ν_2, ρ_2 . Пусть в поставленной задаче цилиндрическая оболочка длинна по оси z . В этом случае приведем уравнение Ламе теории упругости к простому виду, считая, что деформация оболочки в направлении оси z равна нулю

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

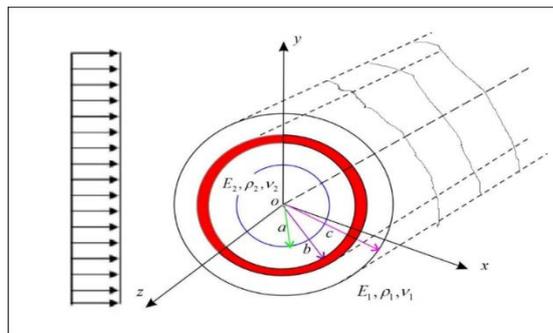


Рисунок 1. Схема расчета задачи о волновой нагрузке на цилиндрическую оболочку, находящуюся в контакте с деформируемой средой при этом $\tilde{\lambda}_j, \tilde{\mu}_j$ и \tilde{E}_k эластические модули в операторном виде

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_j f(t) &= \lambda_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\lambda}^{(i)}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right], \\ \tilde{\mu}_j f(t) &= \mu_{0j} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_{\mu}^{(i)}(t-\tau) f(\tau) d\tau \right]; \\ \tilde{E} f(t) &= E_{01} \left[f(t) - \int_{-\infty}^t R_E(t-\tau) f(t) d\tau \right], \end{aligned}$$

$f(t)$ – произвольная непрерывная функция; $R_E^{(i)}(t-\tau), R_{\mu}^{(i)}(t-\tau)$ и $R_{\lambda}^{(i)}(t-\tau)$ – ядро релаксации; λ_{0j}, μ_{0j} – мгновенный модуль упругости в теории вязкости слоя, E_{01} – мгновенный модуль упругости оболочки. В работе изучены динамические свойства механической системы при выполнении условий, при которых выполняются два разных условия контакта на контакте среды и твердого тела, т. е. состояния, при котором выполняется скользящий контакт, условия состояния в контакте с твердым телом и безмассовыми элементами со средой.

Если цилиндрическое тело состоит из слоев, то его движения будут в виде уравнения (1). Между слоями ставится условие жесткой фиксации:

$$\begin{aligned} r = a_k : \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)}; \quad \sigma_{rz k} = \sigma_{rz(k+1)}; \\ u_k = u_{k+1}; \quad \mathcal{G}_k = \mathcal{G}_{k+1}; \quad w_k = w_{k+1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Между слоями ставится условие скольжения (при отсутствии сопротивления между слоями):

$$\begin{aligned} r = a_k : \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \quad \sigma_{r\theta k} = \sigma_{rz k} = 0; \\ \sigma_{r\theta(k+1)} = \sigma_{rz(k+1)} = 0; \quad w_k = w_{k+1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если учесть сопротивление между слоями, то

$$r = a_k : \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta k} = k\sigma_{rrk};$$

$$\sigma_{r\theta(k+1)} = \sigma_{r\theta(k+1)} = k\sigma_{rr(k+1)}; w_k = w_{k+1}.$$

Если $r = a_1$ первый слой без жидкости, то ставится условие освобождения от напряжений:

$$r = a_k : \sigma_{rrN} = 0; \sigma_{r\theta N} = 0; \sigma_{rzN} = 0. \quad (4)$$

Если между слоями поместить безмассовый элемент, то граничное (контактное) условие для задачи о состоянии плоской деформации будет следующим:

$$r = a_k : \sigma_{rrk} = \sigma_{rr(k+1)}; \sigma_{r\theta k} = \sigma_{r\theta(k+1)};$$

$$\sigma_{rrk} = \bar{k}_r (u_{rk} - u_{r(k+1)});$$

$$\sigma_{r\theta k} = \bar{k}_\theta (u_{\theta k} - u_{\theta(k+1)}). \quad (5)$$

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

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

Во многих работах упоминается, что эффект полуплоскости или бесконечно вязкоупругой среды или давление отдачи также могут быть учтены приближенными методами. Предположим, что конструкция соприкасается с окружающей средой безмассовыми деформируемыми элементами (безинерционный элемент). Это также называется основой Винклера. Для цилиндрической трубы цилиндрическая система координат будет иметь вид:

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k; \quad q_{1\theta}^k = 0, \quad (6)$$

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

k_{r0}^k - коэффициент мгновенного поста, $R_k(t-\tau)$ - ядро релаксации. Если взять основание Винклера, то есть, учитывая силу инерции основания при использовании (6), оно определяется как:

$$q_{1r}^k = -\tilde{k}_r^k w^k - m_f \ddot{w}^k, \quad (7)$$

При этом m_f - масса эффективной основы. Если учитывать влияние среды на трубу по модели Пастернака, то

$$q_r^k = -\tilde{k}_{r1}^k w^k - \tilde{t}_f \Delta w^k, \quad (8)$$

здесь \tilde{t}_f - операторный коэффициент мгновенного сдвига, \tilde{k}_{r1}^k - операторный коэффициент сжатия.

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

$$1. \varphi_{N+1}^{(i)} = A e^{i(\alpha_{N+1} x - \omega t)}, \psi_{N+1}^{(i)} = 0; \quad 2. \psi_{N+1}^{(i)} = A e^{i(\beta_{N+1} x - \omega t)}, \varphi_{N+1}^{(i)} = 0; \quad 3. \varphi_{N+1}^{(i)} = \varphi_{(N+1)0} i \pi H_o^{(1)}(\alpha_{N+1} \bar{r}) e^{-i\omega t},$$

При этом α_{N+1} - количество волн, ω - частота волны, $A, \varphi_{(N+1)0}$ - амплитуда снижающейся волны.

Если мы изобразим вектор перемещения в последнем полученном уравнении в потенциальном и соленоидном представлениях, то перемещение слоев будет выглядеть следующим образом:

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

Основные вопросы сводятся к вопросу о состоянии пространственной деформации теории упругости. Для пространственного состояния продольный и поперечный волновые потенциалы $\vec{\psi}_j(\psi_{zj}, \psi_{rj}, \psi_{\theta j})$ удовлетворяют следующим интегральным дифференциальным уравнениям

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi_j - \int_{-\infty}^t R_E^{(j)}(t-\tau) \nabla^2 \phi_j d\tau &= \frac{1}{C_{p0j}^2} \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \vec{\psi}_j - \int_{-\infty}^t R_\mu^{(j)}(t-\tau) \nabla^2 \vec{\psi}_j d\tau = \frac{1}{C_{s0j}^2} \frac{\partial^2 \vec{\psi}_j}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \psi_{\theta j} - \frac{\psi_{\theta j}}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{rj}}{\partial \theta} - \int_{-\infty}^t R_E^{(j)}(t-\tau) M_{1\psi_j}(\tau) d\tau - \frac{1}{c_{s0j}^2} \frac{\partial^2 \psi_{\theta j}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \psi_{rj} - \frac{\psi_{rj}}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{\theta j}}{\partial \theta} - \int_{-\infty}^t R_E^{(j)}(t-\tau) M_{2\psi_j}(\tau) d\tau - \frac{1}{c_{s0j}^2} \frac{\partial^2 \psi_{rj}}{\partial t^2} &= 0, \\ M_{1\psi_j}(\tau) = \nabla^2 \psi_{\theta j} - \frac{\psi_{\theta j}}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{rj}}{\partial \theta}, \quad M_{2\psi_j}(\tau) = \nabla^2 \psi_{rj} - \frac{\psi_{rj}}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \psi_{\theta j}}{\partial \theta}. \end{aligned} \quad (10)$$

здесь $\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - дифференциальные

операторы в системе цилиндрических координат и V_j - коэффициент Пуассона. Решение приведенной выше системы уравнений (10) находится следующим образом:

$$\begin{aligned} \phi_j(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \phi_{jn}(\alpha_j r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{rj}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{rjn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ -\cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{\theta j}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{\theta jn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \cos n\theta \\ -\sin n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}; \\ \psi_{zj}(r, \theta, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_{zjn}(\beta_j r) \begin{Bmatrix} \sin n\theta \\ \cos n\theta \end{Bmatrix} e^{\pm i\gamma_p z} e^{-i\omega t}, \\ \alpha_j^2 &= \frac{\bar{\Omega}_j^2}{\gamma_j^2} - \gamma_p^2, \quad \beta_j^2 = \bar{\Omega}_j^2 - \gamma_p^2, \quad \bar{\Omega}_j = \frac{\omega \alpha_j}{c_{s0j} \Gamma_j}, \quad \gamma_j^2 = \frac{2(1-\nu_{0j}) \Gamma_{\lambda\mu j}}{1-2\nu_{0j}}. \end{aligned} \quad (11)$$

здесь n - целое число, γ_{pk} - постоянное число распространения волны, ω -

комплексная частота, $r = \frac{r_1}{a_0}$, $z = \frac{z_1}{a_0}$. Для каждого компонента на

бесконечности ставятся условия Зоммерфельда ($r \rightarrow \infty$). Наложив (10) в (11), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений со следующими комплексными коэффициентами

$$\begin{aligned}
\frac{d^2\phi_j}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\phi_j}{dr} + \left(\alpha_j^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \phi_j &= 0; \\
\frac{d^2\psi_{zj}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{zj}}{dr} + \left(\beta_j^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) \psi_{zj} &= 0; \\
\frac{d^2\psi_{\theta j}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{\theta j}}{dr} + \frac{1}{r^2} \left(-n^2\psi_{\theta j} + 2n\psi_{\theta j} - \psi_{\theta j} \right) \beta^2 \psi_{\theta j} &= 0; \\
\frac{d^2\psi_{rj}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi_{rj}}{dr} + \frac{1}{r^2} \left(-n^2\psi_{rj} + 2n\psi_{\theta j} - \psi_{rj} \right) \beta^2 \psi_{rj} &= 0.
\end{aligned} \tag{12}$$

Первое и второе уравнения системы дифференциальных уравнений (12), представленные выше, являются уравнениями Бесселя, решение которых для цилиндрического слоя и окружающей его среды выражается через функции Бесселя и Неймана или Ханкеля следующим образом:

$$\phi_{nj}(r) = \begin{cases} F_{nj} J_n(\alpha_j r) + E_{nj} N_n(\alpha_j r), & j = N-1 \\ F'_{nj} H_n^{(1)}(\alpha_j r) + E'_{nk} H_n^{(2)}(\alpha_j r), & j = N; \end{cases} \quad \psi_{zj}(r) = \begin{cases} M_{1nj} J_n(\beta_j r) + L_{1nj} N_n(\beta_j r), & j = N-1; \\ M'_{1nj} H_n^{(1)}(\beta_j r) + L'_{1nj} H_n^{(2)}(\beta_j r), & j = N, \end{cases}$$

при этом $J_n(\alpha_j r)$ -функция Бесселя порядка n , $N_n(\alpha_j r)$ - функция Неймана порядка n , $H_n^{(1)}(\beta_k r)$ - однородная функция Ханкеля порядка n , $H_n^{(2)}(\beta_k r)$ - двухродная функция Ханкеля порядка n . Произвольные интегральные константы находятся из граничных или контактных условий. Для их нахождения возьмем систему неоднородных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами

$$\left[C(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j) \right] \{q\} = \{P\}, \tag{13}$$

при этом $\{q\}$ -это вектор-столбец, состоящий из произвольных переменных. Если рассмотреть задачу о свободных колебаниях пространственного цилиндрического тела в вязкоупругой среде, то правая часть системы алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами (13) равна нулю. Тогда получим систему алгебраических уравнений с однородными комплексными коэффициентами $\left[C(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j) \right] \{q\} = \{0\}$. Чтобы система уравнений имела решение, главный определитель ($\left[C(c_{pj}, c_{sj}, R_{Ej}, a_j) \right] = 0$) должен быть равен нулю. Это уравнение представляет собой трансцендентное уравнение с комплексным параметром. Корни уравнения представляют частоту колебаний изучаемой механической системы. Это уравнение решается только численным методом (использовался метод Мюллера). При решении задач о непостоянной волновой нагрузке (и дифракции) разработан алгоритм на основе методов интегральных перестановок (Фурье и Лапласа), Гаусса, Ромберга и Мюллера.

В третьей главе диссертации под названием «**Волновая нагрузка и резонансное состояние цилиндрической оболочки, находящейся в контакте с вязкоупругой средой**» рассмотрен вопрос о динамическом напряженно-деформированном состоянии цилиндрической оболочки, находящейся в разном контакте со средой, расположенной в вязкоупругом пространстве, под действием гармонических волн. Основная цель

исследования-разработка метода и алгоритма исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки под действием гармонических волн в зависимости от показателей.

Предположим, что бесконечно длинная цилиндрическая оболочка находится в контакте со средой. Пусть в вязкоупругой среде находится цилиндрическое тело или оболочка. Пусть среда, окружающая цилиндрическую оболочку будет вязкоупругой изотропной и однородной. Пусть продольные (или поперечные) волны распространяются в этой среде. При попадании волн в оболочку создается волновое напряжение. Пусть этот фронт нагрузки параллелен оси оболочки. Рассматриваемая проблема сводится к задаче о состоянии плоской деформации теории упругости соединения.

Пусть цилиндрическая оболочка имеет внешний радиус $r = R$ и внутренний радиус $r = R_0$. Основная цель данного параграфа состоит в определении состояния деформации в среде под продольной (или поперечной) волновой нагрузкой на цилиндрическую оболочку и напряжений в цилиндрической оболочке. Для цилиндрического тела, находящегося в состоянии плоской деформации, удовлетворяет уравнению движения (1), записанному через смещения. При контакте слоя и среды, т. е. при наличии жесткой фиксации $r = R$, то есть соответствующих смещений и напряжений, ставится условие равенства.

Из численных результатов видно, что наибольшими напряжениями при воздействии продольной волны являются радиальные напряжения на контакте, принимающие наибольшее значение в области длинных волн (рис.2). Частота не может быть найдена в явном виде, если принимается во внимание вязкость. Его можно найти только численным методом. Решается численно по методу Мюллера. Для учета вязкости материала используется трехпараметрическое слабое сингулярное ядро Ржаницына–Колтунова

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

Параметры принимаются в следующем виде

$$A = 0,048; \quad \beta = 0,05; \quad \alpha = 0,1, \quad \nu_1 = \nu_2 = 0,14; \quad h_0 = 0,025; \quad \eta = 0,1$$

Частота колебаний механической системы для неосесимметричного случая приведена в таблице 1. Полученные результаты сравнены с результатами других ученых. Результаты показали, что разница в наложении составляет 10%

Таблица № 1.

Изменение комплексной частоты в зависимости от волнового числа n

n	Pao and Mow	Baron and Parnes	Диссертация усуги
0	0.4474-i0.4420	0.44647-i0.44127	0.44893-i0.44281
1	1.09272-i0.7653	1.09272-i0.7653	1.09373-i0.76532
2	1.90754-i0.8978	1.90754-i0.8978	1.90774-i0.89791

3	2.75632-i0.9915	2.75652-i0.9915	2.75642-i0.99167
4	3.63132-i1.0666	3.63132-i1.0666	3.63138-i1.06672

Изменение комплексной частоты в осесимметричном колебании по соотношению мгновенных модулей Юнга (условие скольжения при контакте) представлено в таблице 2.

Таблица № 2.

Изменение комплексной частоты в осесимметричном колебании в зависимости от соотношения мгновенных модулей Юнга (условие скольжения при контакте)

Ω	E=0,2	E=0,4	E=0,6	E=0,8	E=1,0
Ω_1	4,27953D-02	5,36234D-02	6,01305D-02	6,79341D-02	6,91938D-02
	-i6,34656D-03	-i6,52312D-03	-i6,76328D-03	-i6,21547D-03	-i6,14263D-03

Из анализа следует, что влияние изменения отношения мгновенных модулей эластичности на первую моду удельной частоты оказывается значительным. Оказывается, эффект на высоких частотах очень мал или на уровне, который можно не учитывать. Было обнаружено, что действительные и абстрактные части собственных чисел различаются до 15% в условиях жесткой фиксации и скольжения. Оказывается, увеличение толщины оболочки также может увеличить реальные и абстрактные части конкретных чисел до 20%.

Пусть цилиндрическая оболочка будет идеально заполнена жидкостью. Изучим частоту присущих этой механической системе колебаний. Эту задачу мы также решим, приведя ее к задаче о состоянии плоской деформации теории упругости. Их уравнения движения выражаются через потенциалы смещения волны, как описано в первом разделе

Таблица №3

Изменение комплексной частоты относительно η

Ω	$\eta =0.1$	$\eta =0.3$	$\eta =0.5$	$\eta =0.6$
Ω_1	6.9061D-01	7.0032D-01	9.3200D-01	9.8173D-01
	-i1.2403D-02	-i1.5603D-02	-i1.7701D-01	-i1.9260D-01
Ω_2	1.11563D-00	1.3152D-00	1.5391D-00	1.7102D-00
	-i7.9125D-02	-i8.1334D-01	-i8.7370D-01	-j8.9389-01
Ω_3	1.7516D+00	1.9783D+00	2.1952D+00	2.3830D+00
	-i1.550D-01	-i3.3424D-01	-i5.484D-01	-i6.3971-01

Изменение удельных частот представлено в таблице 3.

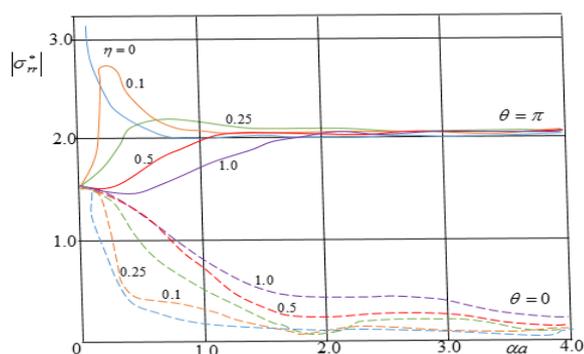


Рисунок 2. Изменение амплитуды напряжений относительно количества волн

Из таблицы следует, что увеличение плотности жидкости приводит к увеличению значения действительной и абстрактной частей частоты. При значениях более 0,5, представляющих увеличение значения плотности η , эффект от этого изменения оказывается незначительным.

Чтобы найти состояние напряжения и деформации, вызванное нестационарной нагрузкой на цилиндрическую оболочку ($q(r, \theta, z, t) = q_0 H(t)$), применяем перестановку Лапласа по времени и Фурье по углу.

Возьмем стальную оболочку трубы параметры которой $D_1 = 0.75, D_2 = 1.0, h = 0.25$. Эпюр контурных напряжений ($t = 1,8$ сек) на внутренней поверхности контурной цилиндрической оболочки ($r = R$) показан на рисунке 3

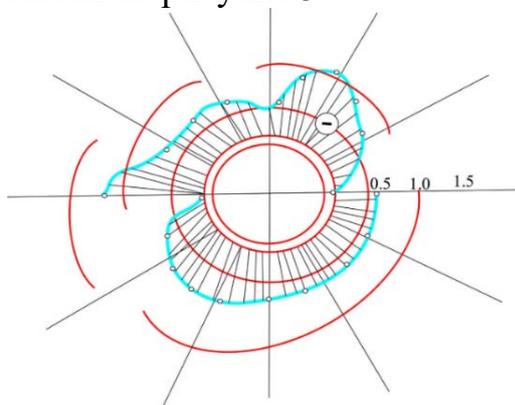


Рисунок 3. Контур напряжение контура ($r = R$) на внутренней поверхности цилиндрической оболочки ($t = 1,8$ сек)

Таким образом, в третьей главе были решены вопросы свободного и вынужденного колебания цилиндрической оболочки при выполнении различных граничных условий. Было обнаружено, что максимальные напряжения увеличиваются до 25% в длинноволновом поле по сравнению с полным контактом. При этом θ_0 угол снижения волны.

В этом случае также изучается влияние плоской волны. На рисунке показаны численные результаты, полученные в длинноволновом поле. Было обнаружено, что максимальные напряжения максимальны в длинноволновом поле и на 20% больше чем состояния статического напряжения.

В четвертой главе, озаглавленной как **“Нагрузка гармонических внешних волн на вязкоупругие трубы цилиндрической формы”**,

исследуется вопрос о нагрузке гармонических внешних волн на вязкоупругие тела цилиндрической формы. В этой главе проставлен вопрос о нагрузке внешней (релейной) волны, распространяющейся по поверхности гармонической (или негармонической) вязкоупругой среды на цилиндрическую трубу, и проводится численный анализ динамических характеристик. Тогда уравнение движения стержня будет как:

$$E_{0k} \Gamma_k \frac{\partial^2 U_p(z, t)}{\partial z^2} + \{2\sigma_{rz}(\Gamma_k, a, z, t)/a\} - \rho \frac{\partial^2 U_p(z, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (14)$$

здесь $\sigma_{rz}(a, z, t)$ напряжение сдвига. При контакте трубы и среды выполняется следующее условие $\mathcal{S}_1(a, z, t) = U_c(a, z, t)$, на поверхность полуплоскости подается напряжение, образуемое волной Релея

$$(\sigma_{yy})_{y=h} = f_1(y, z, t); \quad (\sigma_{zy})_{y=h} = f_2(y, z, t)$$

Удовлетворяется условие поглощения Зоммерфельда на бесконечности.

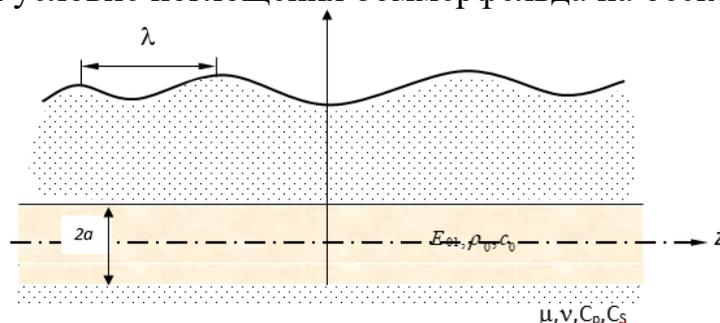


Рисунок 4. Схема расчетов

Рассмотрим распространение волны стержня по оси z , решение интегро-дифференциального уравнения выражается с помощью специальных функций (Бесселя, Неймана и Ханкеля). Если использовать пограничные условия, мы получим следующее дисперсионное уравнение:

$$(1 - \varepsilon^2) [H_0^{(1)}(\gamma_p) H_1^{(1)}(\gamma_s) + \{\gamma_p \gamma_s (2\pi \eta)^2\} H_0^{(1)}(\gamma_s) H_1^{(1)}(\gamma_p)] + (R_D \varepsilon^2 / \pi \eta) [(\varepsilon / R_S)^2 - 1]^{1/2} H_1^{(1)}(\gamma_s) H_1^{(1)}(\gamma_p) = 0, \quad (15)$$

при этом $\varepsilon = c / \bar{c}$, $\eta = a / \lambda$, $R_c = c_p \Gamma_{1k} / \Gamma_{2k} c_s$; $R_v = c_p \Gamma_{1k} / \bar{c}$; $R_D = \rho / \bar{\rho}$.

Дисперсионное уравнение (15) было решено на основе метода Мюллера. Вязкость среды при расчетах найдена через трехпараметрическое релаксационное ядро Колтунова-Ржаницина $R(t) = A e^{-\beta t} / t^{1-\alpha}$: $A = 0,048$; $\beta = 0,05$; $\alpha = 0,1$ Параметры, представляющие механическую систему, были получены следующим образом:

$$\nu_c = 0,25, \Pi_\nu = c_{pc} / c_0 = 1,50,$$

$$\Pi_c = [2(1 - \nu_c) / (1 - 2\nu_c)]^{1/2}, \Pi_D = \rho_c / \rho_0.$$

Численные результаты фазовых скоростей представлены на рисунках 5 и 6. Чтобы свободная волна распространялась на стержне, скорость распространения продольной волны на стержне, не находящемся в среде,

должна быть меньше скорости распространения продольной волны в среде. Полученные результаты позволяют установить, что при принудительном движении грунта в стержне происходит параметрически-зависимое резонансное явление. при численных расчетах были замечены кривые дисперсии (для стержней) и дисперсионные поверхности.

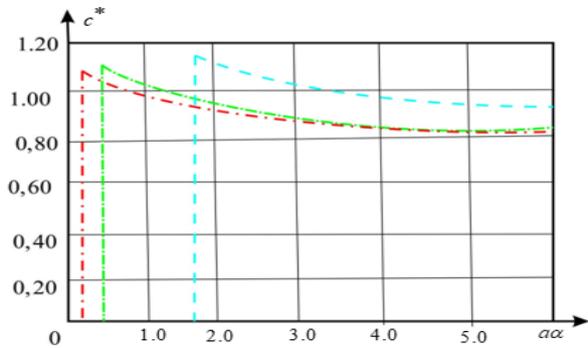


Рисунок 5. Зависимость действительной части фазовой скорости от волнового числа $v_c = 0.25, \Pi_v = c_{pc} / c_0 = 1.50$.

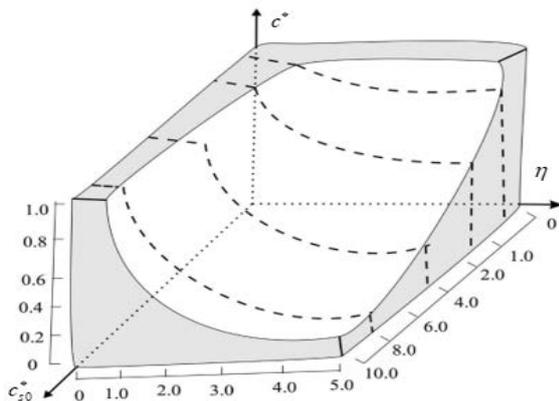


Рисунок 6. Изменение действительной части фазовой скорости дисперсионной поверхности в зависимости от числа волн и параметров $v_c = 0.25, \Pi_D = 0.90$

В результате их анализа можно будет управлять резонансным явлением цилиндрического стержня, находящегося в грунте. В результате численного расчета установлены верхняя и нижняя границы распространения фазовых скоростей (в механической системе «стержень-грунт»). в системе «стержень-грунт» условие распространения свободной волны в стационарных условиях должно быть выполнено. $c_0 < c_s$

Если $c_0 > c_s$, то свободная волна не распространяется, то есть решением уравнения дисперсии будет абстрактная величина. Он представляет собой волны, которые быстро гаснут или негармоничны. Поскольку соотношение плотностей также сильно влияет на распространение свободных волн. По мере увеличения плотности стержня напряжения и смещения уменьшаются, а скорость фазы увеличивается. Это заметно при соотношении плотностей 0,5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов по теме диссертационной работы «Свойства свободных и вынужденных колебаний цилиндрической оболочки, контактирующей с вязкоупругой средой» сделаны следующие заключения:

1. Разработана методика и алгоритм определения напряжений и деформационных состояний, возникающих при нагрузке продольных и поперечных волн при выполнении различных условий контакта (соединения) цилиндрической оболочки со средой, находящейся в

деформируемой (вязкоупругой) среде, с учетом вязкостных свойств материалов. Разработанная методика основана на методе специальных функций математической физики, методах Мюллера, Лапласа и Гаусса, а также потенциалах Грина-Лемба.

2. Разработана методика постановки, решения и алгоритм математической задачи постановки задачи о характерных колебаниях пространственной цилиндрической оболочки, находящейся в вязкоупругой среде, при выполнении различных условий контакта (связи) со средой с учетом вязкостных свойств материала и волнового затухания.

3. Из анализа численных результатов было обнаружено, что максимальное динамическое давление, оказываемое на цилиндрическую оболочку в диапазоне $0.24 \leq D/\lambda \leq 0.42$ длин волн, на 12-15% больше статического. При выполнении условия $0.42 \leq D/\lambda < 1$ максимальное динамическое давление на цилиндрическую оболочку уменьшается и приближается к статическому давлению. Если принять во внимание вязкость среды максимальное динамическое давление $D/\lambda = 0.9478$ приравнивается к статическому давлению. Помимо этого, из расчетов следует, что когда дифракция волны $0 < D/\lambda < 1$, учет оказывается возможным упростить, приведя к проблеме квазистатики из-за меньшего влияния на нагрузку. Для структур, находящихся в среде, когда дифракционное состояние необходимо учитывать быть найденным. Обнаруживается, что дифракционное состояние необходимо учитывать для сооружений, находящихся в среде, когда $D/\lambda > 1$.

4. Выяснилось, что воздействие (или напряжение) сейсмической волны на кору зависит от плотности среды (грунта) и от величины контактного сопротивления. Установлено, что изменение толщины железобетонной трубы не оказывает влияния на величину коэффициента динамического давления грунта

5. Установлено, что если не учитывать инерцию среды (основание Винклера) значение первой частоты возрастает до 20%, значение второй частоты - до 5-10%, а значение третьей частоты практически не изменяется.

6. Оказывается, снижение относительной жесткости оболочки также приводит к снижению концентрации напряжений. Было обнаружено, что максимальная концентрация напряжений на скользящем контакте в области длинных волн до 20% выше, чем на полном контакте. В области длинных волн было обнаружено немонокотное изменение напряжения относительно волнового числа на жестко фиксированном контакте.

**SCIENTIFIC PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 03 FOR ADDING
SCIENTIFIC DEGREES AT THE BUKHARA ENGINEERING AND
TECHNOLOGICAL INSTITUTE**

BUKHARA ENGINEERING AND TECHNOLOGICAL INSTITUTE

AKHMEDOV MAKSUD SHARIPOVICH

**PROPERTIES OF FREE AND FORCED VIBRATIONS OF A
CYLINDRICAL SHELL IN CONTACT WITH A VISCOELASTIC
MEDIUM**

01.02.04 - Mechanics of a deformable solid body

**ABSTRACT
DISSERTATIONS OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHICAL SCIENCES
(PhD) IN PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Bukhara – 2022

The topic of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered for B 2022.3.PhD/FM18 in the Higher Attestation Commission under the Cabinet Ministers of the Republic of Uzbekistan

The dissertation was completed at the Bukhara Engineering and Technology Institute.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the web page of the Scientific Council (www.bmti.uz) and on the Information and Educational Portal "ZiyoNet" (www.ziyo.net).

Scientific adviser :

Teshaev Mukhsin Khudoyberdievich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor

Official Opponents:

Mavlonov Tulqin Mavlonovich
doctor of technical sciences, professor

Ismayilov Kubaymurat
doctor of technical sciences, professor

Lead organization:

Tashkent Institute of Chemical Technology

The defense of the dissertation will take place "19" December 2022 at "14:00" hours at a meeting of the Scientific Council Phd.03/27.02.2021.FM.101.02. at the Bukhara Institute of Engineering and Technology at the address: 200100, Bukhara, st. K. Murtazaev, 15. Tel.: (+99865) 223-78-84; Fax: (+99865) 223-79-72, e-mail: bmti_info@edu.uz.

The dissertation can be found at the Information Resource Center of the Bukhara Engineering and Technology Institute (registered under the number No. 404.). (Address: Bukhara region, 200100, Bukhara, K. Murtazaev st., 15. Tel.: (+99895) 604-44-70).

The dissertation abstract has been sent out «___» _____ 2022 year.
(distribution protocol №3 from "19" november 2022 y.)

N.N. Sadullayev
Chairman of the Scientific Council
for awarding academic degrees,

Z.I. Boltaev
Scientific Secretary of the Scientific Council
for awarding academic degrees,

M.Z. Sharipov
Chairman of the scientific seminar
at the scientific council for the award
degrees,

INTRODUCTION (PhD dissertation abstract)

The purpose of the study is the development of a computational method and algorithm aimed at assessing the stress-strain state of cylindrical structures with circular cross sections of surfaces that are in full contact with a viscoelastic medium under the action of dynamic loads, improving analytical and numerical calculation methods.

The objectives of the research:

-development and comparative evaluation of a technique and algorithm for solving the problem of the dynamic stress-strain state of a spatial cylindrical shell in contact with a viscoelastic medium under the action of harmonic (or unstable) waves;

-development of a technique and algorithm for finding complex frequencies and forms of characteristic oscillations of a cylindrical shell in contact with a viscoelastic medium;

-comparative assessment of the state of dynamic stress-strain that occurs when an unstable load is applied to a three-dimensional cylindrical shell;

-assessment of the influence of the viscosity of a cylindrical shell and its environment in a dynamic stress-strain state.

As an object studies were taken round shells (or tunnels) of cross-sections of surfaces that are in full contact with a viscoelastic medium.

Subject of study constitute the processes of determining the stress-strain states and dynamic characteristics of cylindrical shells in contact with a deformable viscoelastic medium under the action of harmonic (or unstable) waves, taking into account the viscous properties of materials.

Research methods. In the course of the study, the methods of mechanics of deformable solids and structural mechanics, methods of computational mathematics, mathematical modeling, programming, “freezing” for solving partial derivatives of differential equations, separation of variables, methods of Gauss and Laplace were used.

Scientific novelty of the research consists of the following:

a technique and algorithm for solving the problem of the dynamic stress-strain state of a spatial cylindrical shell in contact with a viscoelastic medium under the action of harmonic (or unstable) waves were developed and a comparative assessment was carried out;

a technique and algorithm for finding complex frequencies and forms of characteristic oscillations of a cylindrical shell in contact with a viscoelastic medium;

a comparative assessment of the dynamic stress-strain state created by an unstable load on a three-dimensional cylindrical shell is given.

Implementation of research results. Scientific results obtained in the research work on the basis of methods for calculating the dynamic stress-strain state of cylindrical shells in elastic and viscoelastic media under the action of dynamic forces:

-use of classical kernels to find relaxation kernels in integro-differential equations (inverse problem) comparison of kernels found by analytical methods solutions used in the fundamental project No. OT-F4-02 “Thermodynamics of mathematical physics models with an infinite set of states” completed in 2017-2020 in Bukhara State University (Reference No. 01-04 / 01-1505 dated August 26, 2022). As a result of using the results of scientific work, it was found that the difference between the found parameters of the relaxation kernel and the classical kernel does not exceed 15%. With the help of various standard kernels proposed in the dissertation, it was possible to determine the correlations between the parameters of the kernel.

-Scientific results, methods and materials of the dissertation work were used in the scientific project of fundamental research No. OT - F4-04 (05) on the topic “Application of the spectral method to the solution of matrix nonlinear evolution equations; biomechanics of the cardiovascular system” performed in 2017-2020 at Urgench State University (reference No. 01-184/15 dated August 19, 2022). They were used to prove the complete integrability of a non-linear general Todd chain with an adapted source; to derive an algorithm for constructing a solution to the Cauchy problem for the Korteweg-de Vries equation with an adapted threshold source with a Hadley load and to find numerical values for examples in some particular cases; to determine the hydrodynamic resistance, taking into account the elasticity and permeability of the walls of large blood vessels. As a result, this made it possible to arrange the corresponding numbers, consisting of complex quantities, on the complex plane and estimate the eigenvectors corresponding to them.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and applications. The volume of the dissertation is 108 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Ахмедов М.Ш.. Определение гидродинамического давления на стенку трубы, вызванного потоком жидкости. Бухоро давлат универстети илмий ахбороти//. Бухоро – 2013 – № 4(52). – С.15-18 (01.00.00 №3).
2. Safarov I.I., Axmedov M.Sh. Impact of longitudinal and transverse waves by cylindrical layers were liquid// Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST) Vol. 1 Issue 4, November – 2014 P. 273-281. (№2- Journal Impact Factor; IF=2.27)
3. Safarov I.I., Axmedov M.Sh. Non-Stationary Interaction of Elastic of Waves with Cylindrical Shells. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST) Volum. 2 Issue 1, January – 2015 p. 251-254. (№2- Journal Impact Factor; IF=2.27)
4. Safarov I.I. Boltaev Z.I., Axmedov M.Sh. Setting the Linear Oscillations of Structural Heterogeneity Viscoelastic Lamellar Systems with Point Relations. Applied Mathematics. – 2015. – p. 228-234. Published Online February - 2015 in SciRes.<http://dx.doi.org/10.4236/am.2015.62022> (№2- Journal Impact Factor; IF=0,61)
5. Safarov I.I., Boltaev Z.I., Axmedov M.Sh. Natural Oscillations of Cylindrical Bodies with External Friction on the Boundary. Applied Mathematics. – 2015. 6. 629-645. Published Online March - 2015 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/am> (№2- Journal Impact Factor; IF=0,61)
6. Safarov I.I., Tshaev M.Kh. Boltaev Z.I., Axmedov M.Sh. Properties Of Wave Motion In A Cylindrical Shell Is In Contact With A Viscous Fluid.// Case Studies Journal. ISSN (2305-509X) – Volume 6, Issue 1.–Jan. - 2017. <http://www.casestudies.journal.com>. 9-35 p. (№2- Journal Impact Factor; IF=4,428)
7. Safarov I.I., Tshaev M.Kh. Ruziyev T.R., Axmedov M.Sh. Application Of The Method Of Finite Elements For Investigation Of The Dynamic Stress-Deformed Condition Of Pipeline Sides When Exposed To External Loads.// Case Studies Journal ISSN (2305-509X) – Volume 6, Issue 5 – May. - 2017. <http://www.casestudies.journal.com>. 38-45 p. (№2- Journal Impact Factor; IF=4,428)
8. Safarov I.I., Tshaev M.Kh. Boltaev Z.I., Axmedov M.Sh. Damping Properties of Vibrations of Three-Layer Viscoelastic Plate. International Journal of Theoretical and Applied Mathematics. 2017; 3(6): 191-198 <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ijtam> (№2- Journal Impact Factor; IF=0,61)
9. Kulmurotov N.R., Axmedov M.Sh., Juraev T.O. On the action of a moving pressure wave on a viscoelastic cylindrical shell interacting with an ideal liquid.// ISJ Theoretical & Applied Science, 05 (97). - 2021y. 213-218. Soi: (№5 Global Impact Factor; GIF=0,564)

II бўлим (II часть, II part)

10. (Монография). Сафаров И.И., Болтаев З.И., Ахмедов М.Ш., Собственные волны в слоистых кусочно однородных диссипативных средах. – Германия, ЛАП. Ламберт Академические издания – 2016.-201 с.

11. Safarov I.I., Axmedov M.Sh., Boltaev Z.I. Waves in a visco elastic cylinder with radial cracks.// IJRRAS 20 (2) August.–2014 www.arpapress.com. Volume 20, Issue 2. - IJRRAS_20_2_03.pdf.P. 65-70.

12. Safarov I.I., Axmedov M.Sh. Dissemination Sinusoidal Waves in of A Viscoelastic Strip. Global Journal of Science Frontier Research: F Mathematics & Decision Sciences Volume 15 Issue 1 (Ver. 1.0)

13. Сафаров И.И., Болтаев З.И., Ахмедов М.Ш. Воздействие гармонических волн на цилиндрические слои с жидкостью. Строительная механика и расчет сооружения (СМ и РС). – М. – 2015. – №1. – С. 74-80

14. Safarov I.I., Teshayev M.Kh. Boltaev Z.I., Axmedov M.Sh. Common natural waves in dissipative inhomogeneous plane bodies. The International journal. ISSN 2278 – 5469 EISSN 2278 – 5450©. – 2016. Discovery Publication. All Rights Reserved. 2108-2126 P.

15. Safarov I.I., Teshayev M.Kh. Boltaev Z.I., Axmedov M.Sh. About distribution of own waves in the dissipative layered cylindrical bodies interacting with Wednesday. The International journal ISSN 2278 – 5469 EISSN 2278 – 5450©. - 2017 Discovery Publication. Discovery. – 2017. 53(253), P.16-29.

16. Ruziyev T.R., Axmedov M.Sh., Nuriddinov B. Z. Harmonic Oscillations of Spherical Bodies in a Viscoelastic Environment. International Journal of Emerging Engineering Research and Technology V 6, - I7.2018. 30-37 p.

17. Сафаров И.И., Болтаев З.И., Ахмедов М.Ш., Свободные волн в клине с произвольным углом вершины. «Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в новом тысячелетии» Ежемесячный научный журнал № 9.–2014. 17-18 октября,–Новосибирск,–Россия. – С.56-60.

18. Сафаров И.И., Ахмедов М.Ш., Взаимодействии сейсмических волн с трубопроводами в одномерном приближении. «Замонавий илғор ва инновацион технологиялар» мавзусида Республика илмий-амалий анжумани мақолалар тўплами. – Бухоро. – 2012. 254-256 б.

19. Сафаров И.И., Ахмедов М.Ш., Нуриддинов Б.З., Распространение волн в цилиндрических оболочках с вязкой жидкостью. “Фан-техника ютуқлари халқимизни обод турмуш тарзини юксалтириш йўлида” мавзусида профессор-ўқитувчилар, изланувчилар, магистрлар ва талабалар илмий амалий анжумани мақолалар тўплами.– 2013 йил. 23-26 апрел. 2-қисм.–Бухоро – 2013.168-170 б.

20. Ахмедов М.Ш.. Воздействию нестационарных волн на цилиндрическую оболочку. «Юқори технологияларга асосланган техник ва технологик жараёнларни моделлаштиришнинг замонавий муаммолари». «Олий математика» кафедраси ташкил этилганлигининг 50 йиллигига бағишланади мавзусида республика илмий-амалий анжумани. 26-28 ноябрь. Бухоро – 2013 й. 32-35 б.

21. Сафаров И.И., Ахмедов М.Ш., О распространение упругих волн в изотропном цилиндре. «Юқори технологияларга асосланган техник ва технологик жараёнларни моделлаштиришнинг замонавий муаммолари» 2-қисм (илова). «Олий математика» кафедраси ташкил этилганлигининг 50 йиллигига бағишланади, мавзусида республика илмий-амалий анжумани 26-28-ноябрь.– Бухоро – 2013 й. 25-29 б.

22. Ахмедов М.Ш., Ашурова У.Д., Суюклик оқувчи тороидал қобикнинг чизикли бўлмаган хусусий ҳосилали дифференциал тенгламаларининг ярим аналитик ечими ҳақида. Математик физика ва замонавий анализнинг турдош масалалари республика илмий – амалий анжумани материаллари. 26-27-ноябрь.– Бухоро – 2015 й. 323-326 б.

23. Сафаров И.И., Умаров А.О. Ахмедов М.Ш., Динамические эффекты, связанные со структурной неоднородностью конструкций. «Современные тенденции развития науки и технологий» - 2016 №1-2 X Международной научно-практической конференции. – Белгород. – 2016. – С. 63-65

24. Рахмонов Б.С., Сафаров И.И. Тешаев М.Х. Ахмедов М.Ш., Натурно-полевые исследования процесса распространения энергии сейсмозрывного импульса от источника взрыва. Материалы XXVI международного симпозиума «динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова Вятчи, 16 – 20 марта - 2020 г. – Москва – 2020. Том 2, – С.11-13

25. Рахмонов Б.С., Сафаров И.И. Тешаев М.Х. Ахмедов М.Ш., Натурное исследование поведения подземного цилиндрического сооружения при действиях сейсмозрывных волн. Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова Вятчи, 16– 20 марта - 2020 г. Москва – 2020. Том 2. – С. 13-15

26. Сафаров И.И., Ахмедов М.Ш., О колебаниях вязкоупругой тороидальной оболочки с протекающей жидкостью. Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. ВМСППС – 2017. 24– 31 мая - 2017 г. – Алушта. – С. 309-312

27. Safarov I.I., Voltaev Z.I., Akhmedov M. Sh., Effect of proximity of source of dilated waves on the dynamic tension of cylinder with liquid. Ташкентский химико-технологический институт материалы республиканской научно-практической конференции прикладные и фундаментальные проблемы естественных наук. 23-октябрь,– 2019 г. – С. 58-70

28. Н.К. Эсанов, Ш.Н. Алмуратов, М.Ш., Ахмедов,. О собственных колебаниях вязкоупругой тороидальной оболочки с протекающей идеальной жидкостью. XXII международная конференция по

вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Вмсппс – 2021.–Алушта, 04–13 сентября,–2021. – С.158-160.

29. I.I. Safarov, M. Kh. Teshayev, B.S. Rahmonov, M. Sh. Akhmedov, DG Rayimov,. Seismic vibrations of spherical bodies in a viscoelastic deformable medium.// Part 1. AIP Conference Proceedings 2432, 030124 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0090433>