

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ВА
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013 Т/ФМ.02.02
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС
ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ИНДИАМИНОВ РАВШАН ШУКУРОВИЧ

**ОРТОТРОП ЭЛЕКТР ЎТКАЗУВЧАНЛИКНИ ҲИСОБГА ОЛГАН
ҲОЛДА ТОК ТАШУВЧИ АЙЛАНМА ҚОБИҚ МАГНИТО-
ЭЛАСТИКЛИК НАЗАРИЯСИНИ РИВОЖЛАНТИРИШ**

**01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси
(физика-математика фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской диссертации
Content of the abstract of doctoral dissertation

Индиаминов Равшан Шукурович

Ортотроп электр ўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда ток ташувчи айланма қобик магнитоэластиклик назариясини ривожлантириш.....3

Индиаминов Равшан Шукурович

Развитие теории магнитоупругости токнесущих оболочек вращения с учетом ортотропной электропроводности.....29

Indiaminov Ravshan Shukurovich

Development of the theory of magnetoelasticity current-carrying shells of rotation with respect to orthotropic electroconductivity.....55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works.....79

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ВА
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013 Т/ФМ.02.02
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС
ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ИНДИАМИНОВ РАВШАН ШУКУРОВИЧ

**ОРТОТРОП ЭЛЕКТР ЎТКАЗУВЧАНЛИКНИ ҲИСОБГА ОЛГАН
ҲОЛДА ТОК ТАШУВЧИ АЙЛАНМА ҚОБИҚ МАГНИТО-
ЭЛАСТИКЛИК НАЗАРИЯСИНИ РИВОЖЛАНТИРИШ**

**01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси
(физика-математика фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2014

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий аттестация комиссиясида 20.02.2014/В2013.1.FM1 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти ва Тошкент ахборот технологиялари университетининг Самарқанд филиалида бажарилган.

Докторлик диссертациясининг тўлиқ матни Тошкент давлат техника университети ва Ўзбекистон Миллий университети хузуридаги 16.07.2013.Т/FM.02.02 рақамли фан доктори илмий даражасини берувчи илмий кенгаш веб-саҳифасида www.tdtu.uz/tadqiqitchi/dis_matn.htm манзилига жойлаштирилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) веб-саҳифада www.tdtu.uz/tadqiqitchi/avr_matn.htm манзилига ва “ZIYONET” Ахборот-таълим порталида www.ziyonet.uz манзилига жойлаштирилган.

**Илмий
маслаҳатчилар:**

Ширинкулов Ташпулат Ширинкулович

техника фанлари доктори, академик

Мольченко Леонид Васильевич

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий
оппонентлар:**

Мардонов Ботиржан Мардонович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Сафаров Исмоил Ибрагимович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Карнаухов Василий Гаврилович

физика-математика фанлари доктори, профессор

**Етакчи
ташкilot:**

Тошкент темир йўл муҳандислари институти

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ва Ўзбекистон Миллий университети хузуридаги 16.07.2013.Т/FM.02.02 рақамли Илмий кенгашнинг «__»_____2014 йил соат__ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўч.,2. Тел./факс: (99871) 227-10-32, e-mail: tadqiqitchi@tdtu.uz).

Докторлик диссертацияси Тошкент давлат техника университети Ахборот-ресурс марказида 01 рақам билан рўйхатга олинган, диссертация билан АРМда танишиш мумкин. (Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўч. 2. Тел.: (99871) 246-46-00).

Диссертация автореферати 2014 йил «__»_____ да тарқатилди.
(2014 йил «__»_____даги №__ рақамли реестр баённомаси).

К.А. Каримов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш раиси т.ф.д., профессор

Н.Дж. Тураходжаев

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш илмий котиби т.ф.н., доцент

М.М. Мирсаидов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш қошидаги илмий семинар
раиси т.ф.д., профессор

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АННОТАЦИЯСИ

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Қўшма майдонлар механикаси муаммоларидан ҳисобланган электромагнитоэластиклик масаларига бўлган қизиқишлар ишлаб чиқаришнинг турли соҳаларидаги замонавий техник жараёнлар талаблари ва инновацион технологияларни яратиш эҳтиёжларидан келиб чиқади. Шунини алоҳида қайд этиб ўтиш лозимки, электромагнит эффектларни ҳисобга олган ҳолда туташ муҳитлар ҳаракатини ўрганиш масалалари, умуман замонавий механикада, хусусан қўшма майдонлар механикасида муҳим ўринни эгаллайди.

Ўз навбатида, қўшма майдонлар назариясини ривожлантириш, хусусан, деформацияланувчан муҳит билан электромагнит эффектларнинг ўзаро таъсир назарияси замонавий қаттиқ жисм механикаси ривожланишининг бош йўналишларидан бири ҳисобланади. Электромагнит майдони билан эластик муҳитнинг ўзаро таъсир механизми ҳар хил бўлиб, қаралаётган жисмнинг геометрик хусусиятлари ва физикавий хоссаларига боғлиқдир. Хусусан, бу таъсир механизмини тадқиқ этиш муаммоли масалалардан бири сифатида анизотроп электр ўтказувчанлик юпка пластинка ва қобикларга нисбатан қаралганда бир қанча махсус хусусиятларга эга бўлади.

Замонавий техникада оптимал конструкцияларни яратиш чизикли бўлмаган қонуният билан ўзгараётган таъсирни ҳисобга олган ҳолда юпка пластинка ва қобиклар шаклидаги конструктив элементларнинг кенг равишда ишлаб чиқаришда қўлланилиши долзарб ҳисобланади. Бунда магнит майдонининг қобик ва пластинка билан ўзаро таъсири туфайли пайдо буладиган электромагнит эффектлар салмоқли ўрин эгаллайди. Электромагнит майдон билан электр ўтказувчи жисмларнинг динамик ва механик кўчишларининг боғлиқлик эффектлари пондеромотор Лоренц кучлари орқали амалга оширилади. Лоренц кучлари ўтказувчи туташ муҳит элементларининг ҳаракати тезлиги ва ташқи магнит майдони, ташқи магнит майдонига нисбатан ўтказиш токиннинг йўналиши ва миқдорларига боғлиқ бўлади. Импульсли магнит майдон ва ток ташувчи элементлар, кўчишлар амплитудасининг катта қийматларидаги юқори частотали тебранишлари учун пондеромотор ўзаро таъсир эффектлари жуда сезиларли бўлади. Шунинг учун биринчи навбатда магнитоэластикликнинг математик асосларини ва алоҳида олинган синф масалаларини ечишнинг амалий усулларини ривожлантириш ниҳоят даражада долзарб ва муҳимдир. Бундай синф масалалари каторида кучли ташқи магнит майдонига жойлаштирилган юпка ток ташувчи анизотроп пластинка ва қобиклар масалалари, шунингдек магнит майдонида юпка элементларнинг чизикли бўлмаган магнитоэластик тебранишлари ҳақидаги масалалари алоҳида таъкидланиши лозимдир.

Чизикли бўлмаган боғланишдаги масалалар тадқиқ қилинганда махсус магнитоэластик эффектлар пайдо бўлиши ҳисобга олинса, ностационар механик ва электромагнит юкланишлар таъсирида бўлган юпка ток ташувчи анизотроп электр ўтказувчанликли, анизотроп пластинка ва қобиклар боғлиқлиги магнитоэластиклиги масаласаларини ечиш усулларини ривожлан-

тириш долзарб ҳисобланади. Чизиқли бўлмаган боғланишдаги магнито-эластиклик масалаларини ўрганишда анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда ўзгарувчан механик ва электромагнит майдонлар таъсирида бўлган ток ташувчи пластинка ва қобикларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини аниқлаш илмий жиҳатдан салмоқли ҳисобланади. Замоनावий техникада конструктив элементлар сифатида кучли магнит майдони таъсири остида бўлган юпқа пластинка ва қобикларнинг кенг равишда ишлаб чиқаришда қўллаш амалий аҳамият касб этади. Шунингдек, кучли магнитли қурилмаларнинг ташқи майдонини экранлаш учун ташувчи элементлар ёки тўсиқлар сифатида бундай конструкцияларнинг ишлатилиши ҳам сабаб бўлади. Шу билан биргаликда, замоनावий ўлчагич тизимларни ишлаб чиқишда, ҳисоблаш техникаси қурилмаларида, катта майдон фонида кучсиз импульсли майдонни ўлчашда, электромагнит майдон таъсирида хизмат қилувчи ходимларни ҳимоя қилиш масалаларини ишлаб чиқишда ва бошқаларда электромагнит мосланувчанлик масалаларини ечиш зарурияти ҳам ушбу омиллар қаторига киради.

Диссертация мавзуси долзарблиги ва зарурияти “Электромагнит мосланувчанликни таъминлаш” тўғрисидаги Ўзбекистон Республикаси қонунларига (1999 й., 1 рақамли, 16 банд; 2003 й., 5 рақамли, 67 банд; 2013 й., № 18 рақамли, 233 банд) мос равишда муаммоларнинг қўйилиши ва уларни ечилиши билан изоҳланади. Анизотроп электр ўтказувчан анизотроп пластинка ва қобиклар электромагнитоэластиклиги боғлиқли масаласалари замоनावий илмий қизиқишлар уйғотади. Анизотроп электр ўтказувчан юпқа анизотроп жисмларда жисм материалининг барча физика-механикавий параметрларини вариациялаш орқали магнитоэластикликнинг оптимал масалаларини ечиш мумкин. Хусусий ҳолда механик ва геометрик параметрлар доимий бўлганда, фақат анизотроп электродинамик параметрларни ўзгартириш ёрдамида сифатли янги механик хусусиятга эга бўлган конструктив элементларни яратиш мумкин. Сўнги йилларда янги электромагнит хусусиятларга эга бўлган янги материаллар яратилган. Бундай материаллар замоनावий техниканинг турли соҳаларида янги технологияларни ишлаб чиқишда самарали ишлатилиши мумкин.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг Ф4 «Математика, механика и информатика» устувор йўналишига мос равишда бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича халқаро илмий тадқиқотлар шарҳи. АҚШ, Германия, Япония, Украина, Арманистон ва бошқа давлатларнинг илмий марказлари, олий таълим муассасаларида қобиклар ва пластинкалар магнитоэластиклиги назариялари муаммолари ечиш бўйича, шунингдек Англия, Франция, Россия ва бошқа давлатларда қобиклар назариясининг геометрик чизиқлимас қўйилган масалаларини ечишда сонли усулларни қўллашга доир илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Замоनावий техниканинг ривожланиши, унинг ҳар хил физик омилларнинг ўзаро таъсири нати-

жасида мураккаб юкланиш шароитида қўлланилиши эластик жисмларда қўшма майдонлар назариясини яратиш заруриятини талаб этади. Ўзаро таъсир муаммолари магнитоэластиклик масалаларида ва магнит майдонида эластик деформацияланувчи электр ўтказувчи жисм ҳаракати масалаларида асос ҳисобланади. Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикасида электромагнит майдон билан механик майдонларнинг ўзаро таъсири эффектларини ўрганиш долзарб масала ҳисобланади.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Пластика ва қобик шаклидаги юпка элементларнинг электромагнит майдони билан мураккаб ўзаро таъсир муаммоларини ишлаб чиқиш кўплаб тадқиқотлар олиб борилганлигига қарамадан тугалланишдан узоқдир ва бу соҳадаги бундан кейинги олиб бориладиган тадқиқотлар, албатта янги эффектларни олиш имкониятини яратади. Эластик жисмнинг электромагнит майдони билан ўзаро таъсири бўйича бажарилган ишларнинг кўпчилиги масала чизиқли қўйилганда қаралган бўлиб, анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликлар ҳисобга олинмаган. Агар ўтказувчи эластик жисмнинг материали анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанлик хоссаларига эга бўлса, у ҳолда майдонларнинг ўзаро таъсири сезиларли равишда мураккабланиши. Шунинг учун анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда магнитоэластик ўзаро таъсир чизиқли бўлмаган назариясини яратиш жаҳон миқёсидаги илмий муаммо ҳисобланади. Мавжуд ишларнинг тахлилидан келиб чиқиб айтиш жойизки, анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда ток ташувчи қобиклар магнитоэластиклигининг боғлиқлиги чизиқли бўлмаган масалалари ҳозирги кунгача ҳал этилмаган. Бунга бошланғич боғлиқлиги магнитоэластик хусусий ҳосилалари дифференциал тенгламалар системасининг мураккаблиги, бундай масалаларни ечиш усуллари ва алгоритмлари мавжуд эмаслиги сабабдир.

Диссертациянинг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги қуйидаги лойиҳаларда ўз аксини топган:

фундаментал илмий лойиҳалар: ФА-Ф8-Ф089- «Уч ўлчамли динамик эластиклик назарияси доирасида пластика ва қобик шаклидаги конструкциялар кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини ҳисоблаш назарий асосларини ишлаб чиқиш» (2007-2011йй.); Ф4-ФК-0-11951-Ф4-024 - «Анизотроп электр ўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда ток ташувчи анизотроп қобиклар электромагнитоэластиклиги боғлиқлиги чизиқлимас масалаларини ечиш методикаси, алгоритми ва дастурий таъминотини яратиш» (2012-2016йй.); Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси фундаментал тадқиқотларни қўллаб-қувватлаш жамғармаси илмий лойиҳаси № 48-08 - «Эластик асос билан ўзаро таъсирда бўлган анизотроп пластика ва қобикларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини тадқиқ қилиш усуллари ишлаб чиқиш» (2008-2009йй.).

Тадқиқотнинг мақсади анизотроп электр ўтказувчанликли анизотроп ток ташувчи жисмлар чизиқлимас магнитоэластиклиги назариясини ривож-

лантириш, ортотроп айланма қобик магнитоэластикликнинг масалаларини математик моделлаштириш ва уларни ечиш.

Мақсадга эришиш учун қуйидаги **тадқиқот вазифалари** қўйилган:

анизотроп электр ўтказувчанлик магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда ток ташувчи анизотроп жисмларнинг магнитоэластик деформацияланишини математик моделлаштириш ва физик ҳолатларини шакллантириш;

ностационар механик ва электромагнит юкланишлар таъсири остида бўлган анизотроп электр ўтказувчанликли юпқа ток ташувчи қобиклар деформацияланиши назариясининг амалий усуллари ва математик асосларини яратиш;

ностационар механик ва электромагнит кучлар таъсири остида бўлган ортотроп электр ўтказувчанликли бикирлиги икки координата йўналишида ўзгарувчан бўлган ток ташувчи айланма қобик чизикли бўлмаган магнитоэластиклиги чегаравий масалаларини тақрибий ечиш услубиятини ривожлантириш;

ностационар таъсирлар остида жойлашган ортотроп электр ўтказувчанликли юпқа ток ташувчи ортотроп айланма қобикнинг магнитоэластиклиги ҳал қилувчи боғлиқли системаси чизиклимас дифференциал тенгламаларини яратиш;

ортотроп айланма қобик магнитоэластиклиги чизиклимас қўйилган боғлиқли динамик масалаларини самарали сонли ечиш усуллари ишлаб чиқиш;

юқорида кўрсатилган жисмларнинг геометрик, механик ва электромагнит параметрларини кенг диапазонда ўзгартириш ёрдамида кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати ва электромагнит эффектлар таҳлилини асослаб бериш;

Тадқиқот объекти сифатида анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда ток ташувчи анизотроп жисмлар олинган.

Тадқиқот предмети - анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда электрўтказувчан жисмларда механик ва электромагнит ўзаро таъсир муаммоларини тадқиқ қилиш учун магнитоэластиклик масалаларини математик моделларини ривожлантириш ва ечиш усуллари ишлаб чиқиш.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида чизиклилаштириш ва турғун бўлган дискрет ортогоналлаштириш усуллари қўлланилган.

Диссертация тадқиқотининг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк маротаба анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни, шунингдек, геометрик чизиклимасликни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи қобиклар магнитоэластиклиги боғлиқли динамик масалаларининг математик қўйилиши шакллантирилган;

илк маротаба чекли ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи ортотроп қобиклар магнитоэластиклиги чизиқлимас икки ўлчамли модели яратилган;

ностационар механик ва электромагнит кучлар таъсири остида бўлган, ортотроп электр ўтказувчанликли, бикирлиги икки координата йўналишида ўзгарувчан, юпқа токўтказувчи айланма қобикнинг симметрик бўлмаган деформацияланишини ифодалайдиган ҳал қилувчи системаси олинган;

ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда ностационар механик ва электромагнит юкланишлар таъсирлари остида жойлашган, ихтиёрий меридианли юпқа ток ташувчи ортотроп айланма қобикнинг деформацияланишини ифодалайдиган магнитоэластиклигининг чизиқлимас дифференциал тенгламалари боғлиқли ҳал қилувчи системаси олинган;

илк маротаба ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда ортотроп айланма қобик магнитоэластиклиги боғлиқли чизиқлимас қўйилган масалаларини ечиш услубияти ва алгоритмлари яратилган;

чекли ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, электромагнит майдони билан деформациянинг механик майдони боғлиқлиги янги эффектлари аниқланган;

ортотроп электр ўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда, ташқи бегона токнинг йўналиши ва зичлиги миқдорини танлаб ортотроп ток ташувчи қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати оптималлаштирилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

эластик жисмнинг электромагнит майдон билан ўзаро таъсирининг янги эффектлари олинган, бу эффектларни ҳисобга олиш янги техниканинг ҳар хил соҳаларидаги кўпгина амалий масалаларни ечишда қўлланилиши мумкин;

олинган тенгламаларга асосланиб, ишда ишлаб чиқилган услубиятдан фойдаланган ҳолда ҳам материалнинг анизотропиясини ҳамда қобик ички электромагнит майдонининг анизотропиясини ҳисобга олиш имконияти яратилади, бу эса ўтказилган ишнинг амалий қиймати ҳисобланади;

кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатининг характерли функциялари қийматлари электромагнит параметрлар, хусусан, ортотроп электр ўтказувчанлик ва материалнинг ортотроп хоссаларига боғлиқ, майдонларнинг ўзаро боғлиқлик таъсирини амалиётда баҳолаш имконини берадиган боғланишлар яратилган.

Олинган натижаларнинг ишончлилиги чегаравий масаланинг коррект қўйилиши, келтириб чиқарилган математик ифодаларнинг қатъийлиги, асосланган ечиш усулларида фойдаланиш ва ечимларнинг аниқлигини баҳолашлар ҳамда бошқа математик қўйилган масалаларнинг ечимлари билан таққослашлар ёрдамида асосланади.

Тадқиқот натижаларининг назарий ва амалий аҳамияти. Тадқиқотда олинган натижаларнинг назарий аҳамияти юпқа қобиклар

назарияси ва чизиклимас магнитоэластиклик назарияларининг ривожланишига салмоқли ҳисса кўшишдан иборат.

Тадқиқот ишининг амалий аҳамиятини эса, ностационар кучлар ва электромагнит майдони таъсирлари остида бўлган, ортотроп электр ўтказувчанликли юпқа токташувчи ортотроп айланма қобикнинг геометрик, механик ва электромагнит параметрларини кенг диапазонда ўзгартириш ёрдамида, шунингдек, ҳар хил юкланишлар ва маҳкамланиш турларида кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини оптималлаштириш ва ҳисоблашлар учун ишлаб чиқилган услубият ва алгоритмлар ташкил этади. Магнит индукцияси ва қирқувчи кучларнинг ўзаро таъсири экстремал қийматларнинг пайдо бўлишини келтириб чиқаради. Олти градусга тенг бўлган конуслик бурчаги танлаб олинган юкланишларда геометрик чизикли бўлмаган назария учун критик эканлиги аниқланган. Бу бурчакни янада камайтириш танлаб олинган юкланишларда қобикнинг турғунлигини йўқотишига олиб келади. Конуслик бурчагининг камайиши билан кўчиш ва механик кучланиш, электр майдони кучланганлиги ва магнит индукцияси абсолют қийматларининг ўсиш қонунияти ўрнатилган. Бу далил электромагнит ва механик майдонларнинг ўзаро боғлиқлигини намоён қилади. Механик юкланишлар ва ташқи магнит майдонининг параметрлари аниқ бўлганда ташқи бегона электр токининг ортотроп қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига таъсири баҳоланган. Ортотроп электр ўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда, ташқи бегона электр токининг йўналиши ва зичлиги миқдорини танлаш орқали ностационар механик ва электромагнит майдонлар таъсири остида бўлган қобикнинг кучланганлик ҳолатини оптималлаштириш мумкинлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Тадқиқотда олинган назарий натижалар фундаментал илмий лойиҳа ФА-Ф8-Ф089 - «Уч ўлчамли динамик эластиклик назарияси доирасида пластинка ва қобик шаклидаги конструкциялар кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини ҳисоблаш назарий асосларини ишлаб чиқиш» (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтида бажарилган. Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Фан ва технологияларни ривожлантиришни мувофиқлаштириш қўмитаси хулосаси 26.06.2007й.); ҳамда 48-08- «Эластик асос билан ўзаро таъсирда бўлган анизотроп пластинка ва қобикларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини тадқиқ қилиш усулларини ишлаб чиқиш» (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтида бажарилган. Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси фундаментал тадқиқотларни қўллаб-қувватлаш жамғармаси кенгаши қарори 18.01.2008й.) лойиҳаларда ностационар механик ва электромагнит юкланишлар таъсири остида бўлган анизотроп пластинка ва қобикларнинг деформацияланиши чизиклимас назарияларини ривожлантиришда фойдаланилган.

Ишнинг апробацияси. Тадқиқот натижалари 25 та илмий-амалий анжуманлар, шу қаторда 20 та халқаро анжуманларда апробациядан ўтказилган, жумладан: The 5 th Interational Conference on «European Science and Technology» (Munich, 2013); «Фундаментал ва амалий тадқиқотлар, юқори

савияли технологияларни яратиш ва уларнинг саноатда қўлланилиши» XI-халқаро илмий-амалий анжуман (Санкт-Петербург, 2011); «Сучасні проблеми природничих наук та проблеми підготовки фахівців в цій галузі» XI ва XII - илмий-амалий анжуман (Николаев, 2007, 2009); «Деформацияланувчи қаттиқ жисм ҳисоблаш механикаси» халқаро илмий-техник анжуман (Москва, 2006) ва бошқалар.

Диссертация ишининг асосий натижалари қуйидаги илмий семинарларда маъруза қилинди ва муҳокама этилди: Т.Г.Шевченко номидаги Киев Миллий университети «Гуташ муҳитлар механикаси» кафедраси семинарларида (Киев, 2006-2009); С.П.Тимошенко номидаги Украина Миллий Фанлар академияси Механика институти термозластиклик бўлими илмий семинарида (Киев, 2009); Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти «Фазовий тизимлар динамикаси» лабораторияси илмий семинарларида (Тошкент, 2005-2011); Ўзбекистон Миллий университети «Назарий ва амалий механика» кафедраси илмий семинарида (Тошкент, 2010); М.Улуғбек номидаги Самарқанд давлат архитектура-қурилиш институти қошидаги «Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси» бирлашган шаҳар илмий семинарида (Самарқанд, 2008); Тошкент ахборот технологиялари университети Самарқанд филиали «Ахборот технологиялар», «Компьютер тизимлари», «Табиий фанлар» кафедраларининг бирлашган илмий семинарида (Самарқанд, 2013); Абу Райхон Беруний номидаги Тошкент давлат техника университети ҳамда Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги 16.07.2013.Т/ФМ.02.02. рақамли Илмий кенгаш қошидаги 01.02.04 - «Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси» мутахассислиги бўйича илмий семинарида (Тошкент, 2014).

Натижаларнинг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 51 та илмий иш, жумладан, 12 та илмий мақола халқаро журналларда чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация иши кириш, бешта боб, 253 та номдан иборат фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва 9 та иловадан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 200 бетдан иборат бўлиб, 110 та расм, 5 та жадвални ўз ичига олади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация тадқиқотининг долзарблиги ва эҳтиёжи асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари, ҳамда объект ва предметлари шакллантирилган, Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияси тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқот илмий янгиллиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини жорий қилиш рўйхати, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **биринчи бобида** электромагнит майдонининг деформацияланувчи муҳит билан ўзаро таъсири муаммолари, пластинка ва қобиклар назарияси магниозластиклиги геометрик чизиқлимас қўйилган масала-

ларини ечишга ёндошув муаммоларига бағишланган халқаро илмий тадқиқот ишлари шарҳи келтирилган.

Электромагнитоэластикликнинг маълум бир йўналишлари ривожланишига С.А. Амбарцумян, А.И. Ахиезер, Г.Е. Багдосарян, М.В. Белубекян, Я.И. Бурак, К.Б. Власов, А.С. Вольмир, Б.П. Галапац, А.Р. Гачкевич, Б.М. Гнидец, В.Т. Гринченко, Л.А. Ильюшин, Б.И. Колодий, В.Ф. Кондрат, Я.И. Лопушанский, В.З. Партон, Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Я.С. Подстригач, Л.И. Седов, А.Н. Гузь, Ф.Г. Махорт, И.Т. Селезов, А.Ф. Улитко, С.А. Калоев, В.Г. Карнаухов, М.Р. Короткина, Б.А. Кудрявцев, В. Новацкий, Д.И. Бардзокас, П.А. Мкртчян, К.В. Казарян, С.О. Саркисян, W.F. Brown, L. Knopoff, J.W. Dunkin, A.C. Eringen, M. Carthy, S. Chattopadhyay, S. Kaliski, P. Chadwick, J.C. Baumaner, H.F. Tiersten, A.E. Green, P.M. Naghdi, F.C. Moon, G.A. Maugin, R.A. Toupin, H. Parkus ва бошқалар салмоқли ҳисса қўшган.

Пластинка ва қобиклар назариясининг чизиқлимас магнитоэластиклиги муаммоларини тадқиқ қилишга Я.И. Бурак, А.Р. Гачкевич, Л.В. Мольченко, В.И. Дресвянников, Я.И. Лопушанский, Ф.Г. Махорт, О.Н. Петрищев, А.Л. Радвинский, Р.Ш. Индиаминов, К. Hiroyuki, N. Kikuo, I. Yoshio, T. Nobukazu, G. Nariboli, V.L. Juneja ва бошқаларнинг ишлари бағишланган. Қобиклар назариясининг геометрик чизиқлимас қўйилган масалаларини ечишда сонли усулларни қўллашга Н.В. Валишвили, Я.М. Григоренко ва унинг шогирдлари, А.В. Кармишин, М.С. Корнишин, В.А. Постнов ва бошқаларнинг ишлари бағишланган.

Эластик жисмнинг электромагнит майдони билан ўзаро таъсири бўйича бажарилган ишларнинг кўпчилиги анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олмаган ҳолда қаралган. Агар ўтказувчи эластик жисмнинг материали анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанлик хоссаларига эга бўлса, у ҳолда майдонларнинг ўзаро таъсири сезиларли равишда мураккаблашади. Шунинг учун анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган магнитоэластик ўзаро таъсир чизиқлимас назариясини яратиш назария ва амалиёт нуқтаи назарларидан муҳим илмий қизиқишлар уйғотади. Анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда тоқташувчи қобиклар магнитоэластикликнинг боғлиқли чизиқлимас масалалари ечилмаган эканлигини келтирилган шарҳдан келиб чиқади. Бунга бошланғич боғлиқли магнитоэластик хусусий ҳосилалари дифференциал тенгламалар системасининг мураккаблиги, бундай масалаларни ечиш усуллари ва алгоритмлари мавжуд эмаслиги сабабдир, бу эса диссертация иши мақсадини аниқлаш имконини берди.

Диссертациянинг **иккинчи бобида** анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, тоқташувчи қобиклар чизиқлимас магнитоэластиклигининг масала уч ўлчамли қўйилгандаги бошланғич физик ва математик ҳолатлари, муносабатлари шакллантирилган. Масалани бир қийматли ечиш учун зарур бўлган бошланғич ва чегаравий шартлар қўйилган. Анизотроп электр ўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда, тоқташувчи жисмлар магнитоэластиклиги боғлиқли

чизиқлимас масалалари эйлер ва лагранж кўринишларида муҳокама қилинган. Электродинамика тенгламаларида лагранж ўзгарувчиларига ўтиш амалга оширилган.

Фараз қилайлик жисм электр токи жисмнинг ўзида ҳосил қиладиган магнит майдони ва жисмдан ташқаридаги манба ҳосил қиладиган магнит майдонлари таъсири остида жойлашган бўлсин. Шунингдек жисм электр токини ўтказиш учун ўтказгич (токашувчи жисм) бўлиб хизмат қилади деб қабул қиламиз. Бу ток жисм сиртига ташқи манбадан келтирилади. Бегона электр токи ўйғонмаган ҳолатда жисм бўйича текис тақсимланган (ток зичлиги координаталардан боғлиқ эмас) деб фараз қиламиз. Жисм чекли электр ўтказувчанлик хоссасига эга ва поляризацияланиш ҳамда намагнитланиш хоссаларига эга эмас.

Электромагнит майдони муҳитини тавсифлайдиган тенгламаларни ёзамиз ва микдорларни аниқлаймиз. Фараз қилайлик жисмнинг электромагнит майдони эйлер координаталар системасида \vec{e} электр майдони кучланганлиги вектори, \vec{h} магнит майдони кучланганлиги вектори, \vec{d} электр индукцияси вектори, \vec{b} магнит индукцияси векторлари билан тавсифлансин, лагранж координаталар системасида эса мос ҳолда $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}$ ва \vec{B} билан тавсифлансин.

Эйлер координаталар системаси \vec{x} дан лагранж координаталар системаси $\vec{\xi}$ га ўтишни қуйидаги боғланишлар ёрдамида амалга оширамиз:

$$\begin{aligned} \rho &= \Gamma \rho^*; \quad \vec{E} = F^T \vec{e}; \quad \vec{H} = F^T \vec{h}; \\ \vec{D} &= \Gamma F^{-1} \vec{d}; \quad \vec{B} = \Gamma F^{-1} \vec{b}; \quad \Gamma \rho = P F^T; \\ \vec{P}_R &= P \vec{n}_R; \quad R_e = \Gamma \rho_e; \quad \vec{J} = \Gamma F^{-1} \vec{j} \end{aligned} \quad (1)$$

бунда $\Gamma = \det \begin{vmatrix} \vec{x} \\ \vec{\xi} \end{vmatrix}$, $F = \frac{\partial x_i}{\partial \xi_j}$ ($i, j = 1, 2, 3$). Бу ҳолда анизотроп жисм учун

магнитоэластиклик тенгламалари лагранж ўзгарувчиларида жисм эгаллаб турган соҳада (ички соҳа) қуйидагича ёзилади:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_{cm}; \quad \text{div } \vec{B} = 0, \quad \text{div } \vec{D} = 0; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho (\vec{f} + \vec{f}^\wedge) + \text{div } \vec{\alpha} \quad (3)$$

бунда \vec{J}_{cm} – бегона электр токи зичлиги, \vec{f} – ҳажмий куч, \vec{f}^\wedge – ҳажмий Лоренц кучи, \vec{J} – электр токи зичлиги, $\vec{\alpha}$ – ички кучланиш тензори.

Кучланганлик векторларини электромагнит майдони индукциялари билан боғловчи муносабатлар, шунингдек ҳаракатланувчи муҳитда ўтказгич токини аниқлайдиган Ом қонуни билан магнитоэластиклик тенгламалар системасини ёпиш зарур. Агар анизотроп жисм магнит ва электрик хоссаларига нисбатан чизиқли бўлса, у ҳолда электромагнит характеристикалар учун аниқловчи тенгламалар ва электрўтказувчанлик учун кинематик муносабатлар, шунингдек \vec{J}_{cm} бегона токни ҳисобга олган ҳолда Лоренц кучи учун ифодалар лагранж ўзгарувчиларида мос ҳолда қуйидагича кўринишда ёзилади:

$$\vec{B} = \mu_{ij} \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon_{ij} \vec{E}, \quad (4)$$

$$\vec{J} = \sigma_{ij} \Gamma F^T F^{-1} [\vec{J}_{cm} + \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}], \quad (5)$$

$$\rho \vec{f}^{\wedge} = \Gamma^{-1} F^{-1} [\vec{J}_{cm} \times \vec{B} + \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}]. \quad (6)$$

Бу ерда $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \mu_{ij}$ – мос ҳолда чизиқли анизотроп токташувчи жисмнинг электр ўтказувчанлик, диэлектрик ва магнит сингдирувчанлик тензорлари ($i, j=1,2,3$). Улар бир жинсли анизотроп муҳитлар учун симметрик иккинчи рангли тензорлар ҳисобланади. Шундай қилиб, (2), (3) муносабатлар (4)–(6) билан биргаликда, лагранж шаклида анизотроп электрўтказувчанлик, магнит ва диэлектр сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда анизотроп ток ташувчи жисмнинг магнитоэластиклиги чизиқлимас тенгламалари ёпиқ системасини ташкил этади.

Диссертациянинг **учинчи бобид**а ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи қобиклар икки ўлчамли назариясининг геометрик чизиқлимас модели яратилган. Бунда чекли ўтказувчан, юпқа токташувчи қалинлиги ўзгарувчан қобик поляризацияланиш ва намагнитланиш эффектларини, шунингдек, температура кучланишини ҳисобга олмаган ҳолда қаралади. Қобик материалнинг эластиклик хоссаси ортотроп ҳисобланади, бунда эластикликнинг бош йўналишлари мос координата чизиқларининг йўналишлари билан устма-уст тушади. Қобик материали умумлашган Гук қонунига бўйсунди ва чекли электрўтказувчандир. Ток ташувчи қобик материалнинг электромагнит хоссалари σ_{ij} электр ўтказувчанлик, μ_{ij} магнит сингдирувчанлик ва ε_{ij} ($i, j=1,2,3$) диэлектрик сингдирувчанлик тензорлари билан тавсифланади.

Бунда, кристаллофизикадан келиб чиққан ҳолда, кристал тузилиши ромбик бўлган қаралган ўтказувчи муҳитлар синфи учун $\sigma_{ij}, \mu_{ij}, \varepsilon_{ij}$ тензорлар диагонал кўринишни қабул қилади деб ҳисобланган. Қобик ўрта сиртининг координат чизиқлари бош эгрилик чизиқлари билан устма-уст тушади деб ҳисоблаб, деформацияланмаган ҳолатда ток ташувчи ортотроп қобикнинг координат сиртига α, β, z эгри чизиқли ортогонал координаталар системасини кўямиз.

Кирхгоф-Ляв ва унга мос бўлган электромагнит гипотезаларидан фойдаланиб, виртуал кўчишлар ёрдамида, ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи ортотроп қобиклар магнитоэластиклигининг боғлиқли чизиқлимас тенгламалари тақрибий икки ўлчамли системаси ҳосил қилинган. Бу олинган системанинг ечимини масаланинг моҳиятидан келиб чиққан ҳолда, вакуум учун электродинамика тенгламалари билан биргаликда излаш зарурдир, яъни ташқи масалани ечиш керак. Бу муаммо масала чизиқлимас кўйилганда ҳозирги вақтгача деярли ечилмаган. Аниқ ҳолларда тадқиқ қилинаётган масалалар ҳар хил содалаштирилиши мумкин. Ортотроп қобик сиртида магнит майдонининг вақт бўйича ўзгариши ва тақсимланиш тавсифини аниқ деб ҳисоблаб, фақат ички масалани қараш билан чекланиш мумкин.

Анизотроп пластинка ва қобиклар магнитоэластиклиги гипотезалари сифатида қўйидагиларни танлаймиз:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_1(\alpha, \beta, t); E_2 = E_2(\alpha, \beta, t); E_3 = \frac{\partial u_2}{\partial t} B_1 - \frac{\partial u_1}{\partial t} B_2; \\ J_1 &= J_1(\alpha, \beta, t); J_2 = J_2(\alpha, \beta, t); J_3 = 0; \\ H_1 &= \frac{1}{2}(H_1^+ + H_1^-) + \frac{z}{h}(H_1^+ - H_1^-); \\ H_2 &= \frac{1}{2}(H_2^+ + H_2^-) + \frac{z}{h}(H_2^+ - H_2^-); H_3 = H_3(\alpha, \beta, t). \end{aligned} \quad (7)$$

бу ерда u_i – қобик нуқталари кўчиши вектори компоненталари; E_i, H_i – қобик электр ва магнит майдонлари кучланганлик векторлари компоненталари; J_i – уярмавий ток компоненталари; H_i^\pm – қобик сирти магнит майдони кучланганлиги тангенциал тузувчилари; h – қобик қалинлиги. Қобик сиртидаги чегаравий шартлар, ҳосил қилинган гипотезалардан ва бошланғич статик масаланинг ечимидан фойдаланиб, ортотроп қобик сиртида ташқи магнит майдонининг тақрибий тақсимланиши аниқланган:

$$B_\alpha^\pm = B_{\alpha o}^\pm + B_{\alpha o} - (B_{z o} - B_z)\theta_\alpha; B_\beta^\pm = B_{\beta o}^\pm + B_{\beta o} - (B_{z o} - B_z)\theta_\beta. \quad (8)$$

Бу ерда $B_{\alpha o}^\pm, B_{\beta o}^\pm$ – ташқи бегона ток пайдо қиладиган бошланғич хусусий магнит майдони магнит индукцияси компоненталари; $B_{\alpha o}, B_{\beta o}, B_{z o}$ – статик масалани ечишдан ҳосил қилинган ташқи магнит майдони компоненталари; B_z – қобик магнит индукцияси нормал тузувчиси; θ_α ва θ_β – лар нормалнинг бурилиш бурчаклари. Кейинчалик, (8) чегаравий шартлардан фойдаланиб, ортотроп электр ўтказувчан ортотроп қобик сиртида магнит майдонининг кучланганлиги ўзгаришини унинг деформацияланиши жараёнида ҳисобга олиш имкониятига эга бўламиз.

Ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи ортотроп қобиклар магнитоэластиклигининг ҳозирги икки ўлчамли модели квадратик яқинлашишда қурилган, Лоренц кучи учун ифодаларда эса кубик чизиқлимаслик ҳисобга олинган. Бу деформация чекли бўлган бундай масалаларда чизиқлимас эффектлар асосий ҳисобланиши билан тушунтирилади ва электромагнит майдонининг деформация майдонига таъсири асосан ана шу кучлар орқали содир бўлади. Бурилиш бурчаги ва деформациянинг кичиклиги тўғрисидаги фарздан фойдаланиб, эйлер ва лагранж кўринишларида электромагнит миқдорларнинг тенглиги кўрсатилган.

Ҳосил қилинган тенгламалар икки ўлчамли системаси, деформацияланмаган сиртга нисбатан, ўзгарувчан коэффицентли ўнинчи тартибли гипербола-параболик типдаги боғлиқли чизиқлимас дифференциал тенгламалар системасини ташкил этади.

Олинган натижаларга асосланиб, ток ташувчи ортотроп қобикларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ифодаловчи бошланғич муносабатлар сифатида қуйидаги ёпиқ боғлиқли тенгламалар системасини қабул қиламиз:

ҳаракат тенгламалари

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial \alpha} (BN_\alpha) - N_\beta \frac{\partial B}{\partial \alpha} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \beta} (A^2 S) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{AH}{R_\alpha} \right) + \frac{1}{R_\beta} \frac{\partial A}{\partial \beta} H + \frac{AB}{R_\alpha} Q_\alpha + AB(p_\alpha + n_\alpha + \rho f_\alpha^\wedge) = AB\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\
 & \frac{\partial}{\partial \beta} (AN_\beta) - N_\alpha \frac{\partial A}{\partial \beta} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \alpha} (B^2 S) + \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{BH}{R_\beta} \right) + \frac{1}{R_\alpha} \frac{\partial B}{\partial \alpha} H + \frac{AB}{R_\beta} Q_\beta + \\
 & + AB(p_\beta + n_\beta + \rho f_\beta^\wedge) = AB\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\
 & \frac{\partial}{\partial \alpha} (BQ_\alpha) + \frac{\partial}{\partial \beta} (AQ_\beta) - AB \left(\frac{N_\alpha}{R_\alpha} + \frac{N_\beta}{R_\beta} \right) + AB(p_z + n_z + \rho f_z^\wedge) = AB\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \\
 & \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \beta} (A^2 H) + \frac{\partial}{\partial \alpha} (BM_\alpha) - \frac{\partial B}{\partial \alpha} M_\beta - ABQ_\alpha - AB \left(N_\alpha - \frac{1}{R_\beta} M_\beta \right) \theta_\alpha - \\
 & - ABS\theta_\beta = AB\rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \theta_\alpha}{\partial t^2}; \\
 & \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \alpha} (B^2 H) + \frac{\partial}{\partial \beta} (AM_\beta) - \frac{\partial A}{\partial \beta} M_\alpha - ABQ_\beta - AB \left(N_\beta - \frac{1}{R_\alpha} M_\alpha \right) \theta_\beta - ABS\theta_\alpha = AB\rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \theta_\beta}{\partial t^2};
 \end{aligned} \tag{9}$$

электродинамика тенгламалари

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{1}{AB} \left(\frac{\partial (BE_\beta)}{\partial \alpha} - \frac{\partial (AE_\alpha)}{\partial \beta} \right); \\
 & \sigma_1 \left[E_\alpha + \frac{\partial v}{\partial t} B_z - 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\beta^+ + B_\beta^-) \right] = \frac{1}{B} \left(\frac{\partial H_z}{\partial \beta} - \frac{B(H_\beta^+ - H_\beta^-)}{h} \right); \\
 & \sigma_2 \left[E_\beta - \frac{\partial u}{\partial t} B_z + 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) \right] = \frac{1}{A} \left(-\frac{\partial H_z}{\partial \alpha} + \frac{A(H_\alpha^+ - H_\alpha^-)}{h} \right);
 \end{aligned} \tag{10}$$

кўчишлар ва деформациялар ўртасидаги муносабатлар

$$\begin{aligned}
 & \varepsilon_{\alpha\alpha} = \frac{1}{A} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} v + \frac{w}{R_\alpha} + \frac{1}{2} \theta_\alpha^2; \quad \varepsilon_{\beta\beta} = \frac{1}{B} \frac{\partial v}{\partial \beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} u + \frac{w}{R_\beta} + \frac{1}{2} \theta_\beta^2; \\
 & \varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{A}{B} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{u}{A} \right) + \frac{B}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{v}{B} \right) + \theta_\alpha \theta_\beta; \quad \chi_{\alpha\alpha} = \frac{1}{A} \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \theta_\beta; \quad \chi_{\beta\beta} = \frac{1}{B} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial \beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \theta_\alpha; \\
 & 2\chi_{\alpha\beta} = \frac{1}{A} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial \alpha} + \frac{1}{B} \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial \beta} - \frac{1}{AB} \left(\frac{\partial A}{\partial \beta} \theta_\alpha + \frac{\partial B}{\partial \alpha} \theta_\beta \right) + \frac{1}{R_\alpha} \left(\frac{1}{B} \frac{\partial u}{\partial \beta} - \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} v \right) + \frac{1}{R_\beta} \left(\frac{1}{A} \frac{\partial v}{\partial \alpha} - \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} u \right);
 \end{aligned} \tag{11}$$

бунда $\theta_\alpha = -\frac{1}{A} \frac{\partial w}{\partial \alpha} + \frac{u}{R_\alpha}$; $\theta_\beta = -\frac{1}{B} \frac{\partial w}{\partial \beta} + \frac{v}{R_\beta}$.

эластиклик муносабатлари

$$\begin{aligned}
 & N_\alpha = \frac{e_\alpha h}{1 - \nu_\alpha \nu_\beta} (\varepsilon_{\alpha\alpha} + \nu_\beta \varepsilon_{\beta\beta}); \quad N_\beta = \frac{e_\beta h}{1 - \nu_\alpha \nu_\beta} (\varepsilon_{\beta\beta} + \nu_\alpha \varepsilon_{\alpha\alpha}); \\
 & S = g_{\alpha\beta} h \varepsilon_{\alpha\beta}; \quad H = g_{\alpha\beta} \frac{h^3}{12} 2\chi_{\alpha\beta};
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$M_\alpha = \frac{e_\alpha h^3}{12(1 - \nu_\alpha \nu_\beta)} (\chi_{\alpha\alpha} + \nu_\beta \chi_{\beta\beta}); \quad M_\beta = \frac{e_\beta h^3}{12(1 - \nu_\alpha \nu_\beta)} (\chi_{\beta\beta} + \nu_\alpha \chi_{\alpha\alpha});$$

бунда $\nu_\alpha = \nu_{\beta\alpha}$; $\nu_\beta = \nu_{\alpha\beta}$; $e_\alpha \nu_\beta = e_\beta \nu_\alpha$. Бу ерда N_α, N_β – лар $\alpha = \text{const}$ ва $\beta = \text{const}$ кесимлардаги нормал тангенциал зўриқишлар; S – силжитувчи

зўриқишлар; Q_α, Q_β – кесувчи зўриқишлар; M_α, M_β – эгувчи моментлар; H – буровчи момент; u, v, w – кўчиш вектори компоненталари; $\varepsilon_{\alpha\alpha}, \varepsilon_{\beta\beta}, \varepsilon_{\alpha\beta}$ – чўзилиш ва силжиш тангенциал деформация-лари; $\chi_{\alpha\alpha}, \chi_{\beta\beta}, \chi_{\alpha\beta}$ – эгилиш деформациялари ва буралиш; e_α, e_β – лар мос ҳолда α, β – йўналишлар бўйича эластиклик модуллари; R_α, R_β – лар эгрилик радиуслари; A, B – лар Ламе коэффициентлари; ν_α, ν_β – лар Пуассон коэффициентлари; $h = h(\alpha, \beta)$ – қобик қалинлиги, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – лар солиштирма электр-ўтказувчанлик тензори бош компоненталари. $\rho f_\alpha^\wedge, \rho f_\beta^\wedge, \rho f_z^\wedge$ – лар орқали координата ўқларига пондеромотор кучларнинг проекциялари қийматларини ифодалаймиз:

$$\begin{aligned}
 \rho f_\alpha^\wedge &= -h J_{\beta CT} B_z + \sigma_1 h \left\{ E_\beta B_z + 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) B_z - \frac{\partial u}{\partial t} B_z^2 + \right. \\
 &+ \frac{\partial v}{\partial t} \left[0.25 (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) (B_\beta^+ + B_\beta^-) + \frac{1}{12} (B_\alpha^+ - B_\alpha^-) (B_\beta^+ - B_\beta^-) - (B_\beta^+ + B_\beta^-) B_z \right] + \\
 &+ \left. \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial t} \left[(B_\beta^+ - B_\beta^-) B_z + (B_\alpha^+ B_\beta^+ - B_\alpha^- B_\beta^-) \right] \right\}; \\
 \rho f_\beta^\wedge &= -h J_{\alpha CT} B_z + \sigma_2 h \left\{ -E_\beta B_z + 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\beta^+ + B_\beta^-) - \right. \\
 &- \frac{\partial v}{\partial t} \left[B_z^2 + 0.5 (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) B_z + 0.25 (B_\beta^+ + B_\beta^-)^2 B_z + \frac{1}{12} (B_\beta^+ - B_\beta^-)^2 \right] + \\
 &+ \left. \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial t} \left[(B_\alpha^+ - B_\alpha^-) B_z - (B_\beta^+ - B_\beta^-)^2 \right] \right\}; \\
 \rho f_z^\wedge &= 0.5 h \left[-J_{\alpha CT} (B_\beta^+ + B_\beta^-) + J_{\beta CT} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) \right] + \sigma_3 h \left\{ 0.5 E_\alpha (B_\beta^+ + B_\beta^-) - 0.5 E_\beta (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) - \right. \\
 &- \frac{\partial w}{\partial t} \left[0.25 (B_\beta^+ + B_\beta^-)^2 + 0.25 (B_\alpha^+ + B_\alpha^-)^2 + \frac{1}{12} (B_\beta^+ - B_\beta^-)^2 + \frac{1}{12} (B_\alpha^+ - B_\alpha^-)^2 \right] + \\
 &+ \left. 0.5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) B_z + 0.5 \frac{\partial v}{\partial t} (B_\beta^+ + B_\beta^-) B_z + \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial t} (B_\alpha^+ - B_\alpha^-) B_z + \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial t} (B_\beta^+ - B_\beta^-) B_z \right\}.
 \end{aligned} \tag{13}$$

(9)-(13) тенгламалар системаси, қобик сиртида магнит майдони кучланганлиги тақсимланиши маълум деган шартда, ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, токташувчи ортотроп қобик магнитоэластиклиги чизиқлимас дифференциал тенгламалари тўлиқ ёпиқ боғлиқли системасини ташкил этади. Бу тенгламалар системасини ҳосил қилишда электромагнит майдони ва ташқи бегона токнинг деформация майдонига таъсири Лоренц кучи орқали содир бўлади деб қабул қилинган. Магнитоэластик тенгламалар ёпиқ системаси деформацияланмаган ўрта сиртга нисбатан, отрогонал эгри чизиқли координаталар системасида лагранж ўзгарувчиларида ҳосил қилинган.

Диссертациянинг **тўртинчи бобида** ностационар таъсирлар остида жойлашган ортотроп электрўтказувчанли токташувчи ортотроп айланма қобиклар назарияси чизиқлимас магнитоэластиклиги чегаравий масалаларини ечиш услубияти баён қилинган. Қобиклар назарияси магнитоэластиклиги чизиқлимас масалаларини сонли ечиш учун таклиф этилаётган ёндошув

чекли айирмали Ньюмарк схемаси, чизиклилаштириш ва дискрет ортогоналлаштириш усуллари кетма-кет қўлланилишига асосланган. Келтирилган муносабатлар ва мос гипотезаларга асосланиб, бикирлиги икки координата йўналишида ўзгарувчан бўлган, юпқа тоқташувчи ортотроп айланма қобик кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ёритувчи, ўзгарувчан коэффициентли, чизиклимас дифференциал тенгламаларнинг ҳал қилувчи боғлиқли системаси келтириб чиқарилган. Ностационар механик ва электромагнит кучлар таъсири остида жойлашган, ортотроп электрўтказувчанли, бикирлиги икки координата йўналишида ўзгарувчан бўлган, юпқа тоқташувчи ортотроп айланма қобикнинг динамик масаласи чизиклимас икки ўлчамли чегаравий масалага келтирилган.

Тенгламалар тўлиқ системасидан фойдаланиб, ортогонал эгри чизикли координаталар системасида ортотроп айланма қобик магнитоэластиклиги чизиклимас икки ўлчамли моделини математик ёзиш имкониятини берадиган, ностационар механик ва электромагнит кучлар таъсири остида жойлашган, ортотроп электрўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ихтиёрий меридианли юпқа тоқташувчи ортотроп айланма қобик магнитоэластиклиги чизиклимас дифференциал тенгламаларининг ҳал қилувчи боғлиқли системаси келтириб чиқарилган. Ясовчиси бўйлаб ўзгарувчан қалинликли ортотроп айланма қобикнинг ҳал қилувчи тенгламалар системасини қуришда, эластик ва магнитомеханик тавсифлар параллел бўйлаб ўзгармайди деб ҳисобланади шунингдек, электромагнит майдони ва кўчишлар майдонларининг тенгламаларга кирадиган ҳамма изланаётган компоненталари θ координатадан боғлиқ эмас деб фараз қилинади. Ихтиёрий шаклдаги айланма ортотроп қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилишда қуйидаги фикрлашлардан келиб чиқамиз. Биринчидан, изланаётган тенгламалар системаси ҳамма айланма қобиклар синфини, цилиндрик қобик ва доиравий пластинкани ҳам ўз ичига олиши керак, иккинчидан, масалани сонли ечиш учун қулай кўринишда кўрсатилиши керак, учинчидан, чегаравий шартларни зўриқиш, момент, кўчиш ва аралаш кўринишларда ифодалаш имкониятини бериши керак. Ва ниҳоят, дифференциал тенгламалар системаси шундай функцияларга нисбатан ёзилиши керакки, яъни ҳар хил қобиклар қўшмалик шартларини оддий ҳолда амалга ошириш мумкин бўлсин. Бу фикрлашлардан келиб чиққан ҳолда, ҳал қилувчи функциялар сифатида қуйидагиларни танлаймиз:

$$u_x, u_z, \theta_s, N_x, N_z, M_s, E_\theta, B_\zeta \quad (14)$$

бунда u_x, u_z – лар радиал ва ўқ бўйлаб кўчишлар; N_x, N_z – лар радиал ва ўқ бўйлаб зўриқишлар; E_θ, B_ζ – лар электр майдони кучланганлиги ва магнит майдони индукциясидир, улар u, w кўчишлар ва N_s, Q_s зўриқишлар орқали қуйидагича ифодаланади:

$$\begin{aligned} N_x &= N_s \cos\varphi + Q_s \sin\varphi; N_z = N_s \sin\varphi - Q_s \cos\varphi; \\ u_x &= u \cos\varphi + w \sin\varphi; u_z = u \sin\varphi - w \cos\varphi. \end{aligned} \quad (15)$$

бунда φ – координат сирти нормали ва айланиш ўқи ўртасидаги бурчак.

(14), (15) ларни ҳисобга олиб, бир қанча алмаштиришлардан кейин қуйидаги чизиклимас дифференциал тенгламаларнинг боғлиқли системасини Коши шаклида ҳосил қиламиз:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u_x}{\partial s} &= \frac{1-v_s v_\theta}{e_s h} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \cos \varphi + \frac{v_\theta \cos \varphi}{r} u_x + \frac{1}{R_s} u_z - \sin \varphi \theta_s - \frac{\cos \varphi}{2} \theta_s^2; \\
\frac{\partial u_z}{\partial s} &= \frac{1-v_s v_\theta}{e_s h} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \sin \varphi + \frac{v_\theta \sin \varphi}{r} u_x - \frac{1}{R_s} u_z + \cos \varphi \theta_s - \frac{\sin \varphi}{2} \theta_s^2; \\
\frac{\partial \theta_s}{\partial s} &= \frac{12(1-v_s v_\theta)}{e_s h^3} M_s - \frac{v_\theta \cos \varphi}{r} \theta_s; \\
\frac{\partial N_x}{\partial s} &= \frac{\cos \varphi}{r} \left(v_s \frac{e_\theta}{e_s} - 1 \right) N_x + \left(\frac{1}{R_s} + \frac{v_\theta \sin \varphi}{r} \right) N_z + \frac{e_\theta h}{r^2} \cos \varphi u_x - \\
&- \cos \varphi (P_s + \rho F_s^\wedge) - \sin \varphi (P_\zeta + \rho F_\zeta^\wedge) + \rho h \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}; \\
\frac{\partial N_z}{\partial s} &= -\frac{\cos \varphi}{r} N_z - \frac{1}{R_s} N_x - \sin \varphi (P_s + \rho F_s^\wedge) + \cos \varphi (P_\zeta + \rho F_\zeta^\wedge) + \rho h \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}; \\
\frac{\partial M_s}{\partial s} &= \frac{\cos \varphi}{r} \left(v_s \frac{e_\theta}{e_s} - 1 \right) M_s + \frac{e_\theta h^3 \cos^2 \varphi}{12 r^2} \theta_s - \cos \varphi N_z + \sin \varphi N_x + \\
&+ (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \theta_s - v_s \frac{e_\theta \sin \varphi}{e_s r} M_s \theta_s - \frac{e_\theta h^3 \cos \varphi \sin \varphi}{12 r^2} \theta_s^2; \\
\frac{\partial B_\zeta}{\partial s} &= -\sigma_2 \mu_3 E_\theta - \frac{(B_s^+ - B_s^-) \mu_3}{\mu_1 h} - \\
&- \sigma_2 \mu_3 \left[0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) (B_s^+ + B_s^-) - \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_\zeta \right]; \\
\frac{\partial E_\theta}{\partial s} &= -\frac{\partial B_\zeta}{\partial t} - \frac{\cos \varphi}{r} E_\theta.
\end{aligned} \tag{16}$$

Пондеромотор Лоренц кучи компоненталари қуйидаги кўринишга эга:

$$\begin{aligned}
\rho F_s^\wedge &= -h J_{\theta cm} B_\zeta + \sigma_1 h [E_\theta B_\zeta + \\
&+ 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) B_\zeta (B_s^+ + B_s^-) - \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_\zeta^2]; \\
\rho F_\zeta^\wedge &= 0.5 h J_{\theta cm} (B_s^+ + B_s^-) + \sigma_3 h \{ -0.5 E_\theta (B_s^+ + B_s^-) - \\
&- \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) \left[0.25 (B_s^+ + B_s^-)^2 + \frac{1}{12} (B_s^+ - B_s^-)^2 \right] + \\
&+ 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_\zeta (B_s^+ + B_s^-) \}.
\end{aligned} \tag{17}$$

Бу ерда B_s^\pm – деганда $B_s^\pm = B_{s0}^\pm + B_{s0} - B_{\zeta 0} \theta_s + B_\zeta \theta_s$ эканлигини тушунамиз, бунда B_{s0}^\pm – ташқи электр токи пайдо қиладиган, бошланғич хусусий магнит майдонининг магнит индукцияси компоненталари; B_{s0} – статика масаласини ечишдан ҳосил қилинган ташқи магнит майдони компоненталари; B_ζ – қобикнинг магнит индукцияси нормал ташкил этувчиси; $h = h(s)$ – қобик-

нинг қалинлиги. Ҳосил қилинган саккизинчи тартибли (16) чизиклимас дифференциал тенгламалар боғлиқли ҳал қилувчи системаси, ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ихтиёрий меридианли юпқа ток ташувчи ортотроп айланма қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ифодалайди. Лоренц кучи тузувчилари қобик деформацияланиши тезлиги, ташқи магнит майдони, ташқи магнит майдонига нисбатан ўтказиш токи кучланганлиги ва миқдорларини ҳисобга олади. Ҳаракат тенгламаларида чизиклимасликни ҳисобга олиш пондеромотор кучда чизиклимасликни пайдо қилади. Ҳосил қилинган системага бошланғич ва чегаравий шартларни қўшиб чегаравий масалани ҳосил қиламиз. Чизиклимас чегаравий масалани вектор шаклда қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

ҳаракат тенгламалари

$$\frac{\partial \vec{N}}{\partial s} = \vec{F} \left(s, t, \vec{N}, \frac{\partial \vec{N}}{\partial t}, \frac{\partial^2 \vec{N}}{\partial t^2} \right), \quad \begin{cases} s_0 \leq s \leq s_N, \\ t_0 \leq t \leq t_N \end{cases}, \quad (18)$$

чегаравий шартлар

$$\vec{g}_1(\vec{N}(s_0, t)) = \vec{b}_1^*, \quad \vec{g}_2(\vec{N}(s_N, t)) = \vec{b}_2^*, \quad (19)$$

бошланғич шартлар

$$\vec{N} = 0, \quad \frac{\partial \vec{N}}{\partial t} = 0, \quad \text{npu } t = 0. \quad (20)$$

Бу ерда $\vec{N} = \{u, w, \theta_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\zeta\}^T$ – изланаётган функциялар устун вектори; $\vec{F}, \vec{g}_1, \vec{g}_2, \vec{b}_1^*, \vec{b}_2^*$ – умумий ҳолда чизиклимас вектор функциялар. Магнитоэластикликнинг чегаравий масалаларини ечиш сезиларли даражада ҳисоблаш қийинчиликлари билан боғлиқдир. Бу эса (16) ҳал қилувчи система, саккизинчи тартибли гипербола-параболик типли ўзгарув-чан коэффициентли дифференциал тенгламалар системаси эканлиги билан тушунтирилади. Ностационар механик ва магнит таъсирлари остида бўлган, қаралаётган қобикларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини аниқлаш масалаларида (18), (19) чегаравий масала фиксирланган вақт моментлари учун ечилади. Вақт координатаси бўйича хусусий ҳосилалар Ньюмаркнинг аниқмас схемаси чекли айирмали ифодалари билан аппроксимацияланади ва бу схема қўлланилгандан кейин чизиклимас оддий дифференциал тенгламалар системаси учун чегаравий масалани қуйидаги кўринишда ҳосил қиламиз:

$$\frac{d\vec{N}}{ds} = \vec{F}(s, \vec{N}), \quad (21)$$

ва мос чегаравий шартлар

$$D_1 \vec{N} \Big|_{s=s_0} = \vec{d}_1; \quad D_2 \vec{N} \Big|_{s=s_N} = \vec{d}_2. \quad (22)$$

Чизиклилаштириш усули ёрдамида (15), (16) чегаравий масала чизикли чегаравий масалалар кетма-кетлигига келтирилади ва уларни қисқача қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\frac{d\vec{N}^{k+1}}{ds} = \vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k), \quad (23)$$

$$B_1(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_0) = \vec{b}_1(\vec{N}^k), \quad B_2(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_N) = \vec{b}_2(\vec{N}^k), \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (24)$$

бунда $\vec{N} = \{u, w, \theta_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\zeta\}^T$; \vec{N}^{k+1} ва \vec{N}^k – лар мос ҳолда $k+1$ –чи ва k –чи итерациялардаги ечимлар; $\vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k)$ –тенгламалар системаси ўнг томони вектори; $\vec{B}_1(\vec{N}^k), \vec{B}_2(\vec{N}^k), \vec{b}_1(\vec{N}^k), \vec{b}_2(\vec{N}^k)$ – лар мос ҳолда чегаравий шартлар ўнг қисми матрицалари. Охирги босқичда (23), (24) чизикли чегаравий масалаларнинг ҳар бири дискрет ортогоналлаштириш усули билан ечилади. Бу усул алоҳида олинган интеграллаш нуқталарида Коши масаласи вектор ечимларини ортогоналлаштиришда турғун ҳисоблаш жарёнини таъминлайди. Юпқа тоқташувчи ортотроп айланма қобик магнитоэластиклиги чизиклимас чегаравий масаласини ечиш алгоритми ва дастурини ёзиш берилган.

Ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи ортотроп айланма қобик магнитоэластиклиги янги синф масалаларини ечиш учун ишлаб чиқилган алгоритм, қобикнинг геометрик параметрлари, материалнинг механик тавсифлари, сирт ва контур юкланишлари, чегаравий контурнинг маҳкамланиш турлари, электромагнит майдони параметрларини кенг диапазонда ўзгартириш ёрдамида ечимни олиш имкониятини беради. Алгоритм шундай қурилганки, яъни у бир томондан, физик шакллантириш маъносида етарлича умумийликка эга, бошқа томондан эса, ҳар хил типли қобиклар учун масалаларни ечишда ҳам умумийликка эгадир. Яна у шундай хоссага эгаки, яъни унинг тузилишини бошқа қобиклар назарияси танланганда ҳам ишлатиш мумкин. Шунингдек, тенгламалар системасининг ўнг қисмини ҳисоблашларда ҳар хил интерполяцион формулаларни ҳам ишлатишга руҳсат берилади. Ишлаб чиқилган алгоритм ШЭХМ учун визуал фортран тилида дастур кўринишида жорий қилинган. Дастур модулли тузилишга эга. Ҳисоблаш жараёнининг маълум қисмини жорий қилувчи модулларнинг катта қисми стандарт ҳисобланади. Тақрибий олинган ечимлар бўйича масаланинг ечиш жараёни яқинлашишини баҳолаш, ҳамда масаланинг математик қўйилиши бошқача бўлганда ечимларни таққослашлар ёрдамида олинган натижаларнинг ишончлилиги таҳлили ўтказилган. Ишлаб чиқилган услубиятга асосланган ҳолда, механик кучлар, ташқи бегона ток ва ташқи магнит майдонлари таъсирлари остида жойлашган, изотроп ток ташувчи халқавий пластинка ва конуссимон қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатлари ҳисоби ўтказилган. Вақт бўйича кадамнинг камайиши ва таъсир этувчи кучлар давомийлигининг ўсиши билан, ҳар хил кадамларда кўчиш ва кучланиш қийматлари ўртасидаги фарқнинг сезиларли бўлмаган даражада ўсиши натижаларни таққослашлардан келиб чиқади. Тўртинчи ва бешинчи тақрибий олинган сонли маълумотлар деярли устма-уст тушади, бу эса, итерацион жараён яқинлашиш шартининг қаноатлатирилиши ҳақида гувоҳлик беради. Изотроп ҳолда бошқа муаллифлар олган маълумотлар билан таққослашлар натижалари тақлиф этилган ёндошувнинг ортотроп электр ўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда, юпқа ток ташувчи ортотроп айланма қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини татқиқ қилишда қўлланилиши мумкинлигини кўрсатади.

Диссертациянинг **бешинчи бобида** масала чизиклимас кўйилганда ортотроп электрўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда, ностационар магнит майдонида жойлашган, ток ташувчи ортотроп конуссимон айланма қобик учун магнитоэластиклик масалалари қаралган. Механик юкланиш $P_\zeta = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ H} / \text{м}^2$ таъсири остида жойлашган, бороалюминийдан ясалган, $h = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ўзгармас қалинликли, юпқа ортотроп конуссимон қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати тадқиқ қилинган. Қобик $B_{s_0} = 0.1 \text{ Тл}$ ташқи магнит майдонида жойлашган ва унга ташқи $J_{\theta CT} = -5 \cdot 10^4 \sin \omega t \text{ A} / \text{м}^2$ бегона электр токи зичлиги келтирилади ҳамда қобик чекли $\sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ ортотроп электрўтказувчанликка эга. Қаралаётган ҳолда солиштирма электрик қаршилик анизотропияси $\eta_3 / \eta_1 = 2.27$ тенг. Ортотроп қобикнинг чизиклимас ҳолатига конусликнинг таъсирини ҳисобга олиш қаралган. Масала куйидаги чегаравий шартларда ечилган: $s = s_0$ кичик радиус контури Q_s кесувчи зўриқиш билан юкланган ва нормал йўналишда эркин ва вақт бўйича ўзгарувчан $B_\zeta = 0.3 \sin \omega t$ магнит индукцияси берилади, бунда ω – доиравий частота, магнит индукцияси $B_\zeta = 0$ бўлганда, иккинчи $s = s_N$ контур қаттиқ маҳкамланган. Магнит индукцияси ва кесувчи кучларнинг ўзаро таъсири кўчиш ва механик кучланиш, электр майдони кучланганлиги ва магнит индукцияси экстримал қийматларини пайдо қилиши аниқланган. Магнит индукцияси ва кесувчи куч қобикнинг чап контурида берилади (чегаравий шартлар), бунда Q_s кесувчи зўриқиш ва магнит индукциясининг B_ζ нормал ташкил этувчиси қарама-қарши йўналганлигини таъкидлаб ўтамиз. Конуслик бурчагининг камайиши билан кўчиш ва механик кучланиш, электр майдони кучланганлиги ва магнит индукцияси абсолют қийматларининг ўсиш қонунияти ўрнатилган. $\varphi = \pi/30$ бўлганда бу функцияларнинг максимал қийматлари қолган бурчаклар учун максимал миқдорлари билан таққослашлар бўйича сезиларли ўсади ва s_0 га қараб силжийди. Бу далил электромагнит ва механик майдонларнинг ўзаро боғлиқлигини намоён қилади. Олти градусга тенг конуслик бурчаги қаралган геометрик чизиклимас қобик учун танлаб олинган юкланишларда критик эканлиги аниқланган. Шунингдек, ($\varphi \leq \pi/30$) бурчак янада камайтирилса, қобик турғунлигини йўқотади. Олинган натижалардан келиб чиқиб, φ бурчакнинг конус асосининг бурчагини 90° гача тўлдиришини ҳисобга олган ҳолда, конуслик бурчагининг ортотроп қобик кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига таъсири ҳақида фикр юритишимиз мумкин. Магнит майдонида жойлашган ортотроп электрўтказувчанли қобикда содир бўладиган тебраниш жараён-ларининг соф механик қисми, механик юкланиш таъсири остида жойлашган қобикдаги тебраниш жараёнлари билан мос тушишини таъкидлаб ўтамиз. Бу эса, танланган услубиятнинг тўғрилиги ва ҳосил қилинган тенгламалар коррект эканлигининг яна бир тасдиғи ҳисобланади.

Магнит майдонида жойлашган токташувчи ортотроп қобикнинг ҳолатига чизиклимасликнинг таъсирини ҳисобга олиш масаласи тадқиқ қилинган. Ортотроп конуссимон қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига чизиклимасликнинг таъсирини ҳисобга олишни таҳлил қилиш учун масала чизикли ва чизиклимас қўйилганда олинган ечимлар таққосланган. Масала қуйидаги чегаравий шартларда ечилган: $s = s_0$ кичик радиус контури Q_s кесувчи зўриқиш билан юкланган ва нормал йўналишда эркин ва вақт бўйича ўзгарувчан $B_z = 0.3 \sin \omega t$ магнит индукцияси берилади, бунда ω – доиравий частота, магнит индукцияси $B_z = 0$ бўлганда, иккинчи $s = s_N$ контур қаттиқ маҳкамланган. Магнитостатика масаласини қаноатлан-тирувчи B_{z0} нинг қиймати чизиклимас масала ечимларининг ўртача қиймати сифатида танланган ва $B_{z0} = -0,79 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$ тенг деб қабул қилинган.

Қобикнинг ташқи сиртидаги σ_θ^+ айланма механик кучланиш, w кўчиш, магнит майдони индукциясининг B_z нормал ташкил этувчиси, Лоренц кучи F_s^{\wedge} меридионал ташкил этувчилари қийматлари s дан боғлиқ равишда $\varphi = \pi/30, \pi/15$ бурчаклар учун масала чизикли ва чизиклимас қўйилганда таққосланган. Функцияларнинг қийматлари $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ бўлганда олинган, бунда бу функциялар максимал қийматларга эришади. Функцияларнинг $\varphi = \pi/30$ бурчак учун қийматларини қараб, иккита назария бўйича бу функцияларнинг максимал қийматлари фарқи қуйидагича бўлганлигини, яъни $s = s_0$ контурда w кўчишнинг максимал қий-матлари фарқи 27%; σ_θ^+ учун $s = 0,08 \text{ м}$ бўлганда бу фарқ 97%; B_z учун $s = 0,04 \text{ м}$ бўлганда бу фарқ 41%; $s = s_0$ контурда F_s^{\wedge} нинг максимал қийматлари деярли тенг ва бу фарқ 0,3% ташкил этганлигини таъкидлаб ўтамыз. Функцияларнинг $\varphi = \pi/15$ бурчак учун қийматларини қараган ҳолда, чизикли ва чизиклимас назариялар бўйича, бу функцияларнинг максимал қийматлари натижалари мос тушганлигини таъкидлаб ўтамыз. φ бурчакнинг камайиши билан масала чизикли ва чизиклимас қўйилганда олинган ечимлар ўртасидаги фарқнинг ўсиши қонуниятини ўрнатилган. Шу билан биргаликда, қобикнинг ($s = 0.28; 0.32; 0.36 \text{ м}$) ўнг ён сиртида кучланиш, магнит индукцияси ва Лоренц кучлари учун чизикли ва чизиклимас назариялар бўйича муҳим фарқ борлигини таъкидлаб ўтиш зарурдир. Олинган натижаларни таҳлил қилиб, чизикли назария билан таққослаганда ортотроп қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига геометрик чизиклимасликнинг таъсири ҳақида фикр юритишимиз мумкин.

Ток ташувчи бериллийдан ясалган ортотроп конус ва ток ташувчи алюминийдан ясалган изотроп конус ҳамда магнит майдони ва ташқи бегона ток мавжуд бўлмаганда алюминийдан ясалган изотроп конуслар учун олинган ечимларнинг натижаларини таққослаш асосида масала чизиклимас қўйилганда, юпқа қобикларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати тадқиқ қилинган. Учала ҳолда ҳам кўчишларнинг тақсимланиши чизикли-масдир ва улар максимал қийматларга қобикнинг чап контурида эришадилар.

Шунингдек, бериллийдан ясалган ортотроп конус ва магнит майдонини ҳисобга олиб алюминийдан ясалган изотроп конуслар таққосланганда, кўчиш максимал қийматлари деярли икки мартага фарқ қилади. Конус изотроп бўлиб, магнит ва электр майдонлари таъсирлари бўлмаган ҳолда, кўчишнинг етарлича ошиши аниқланган ($w/h_0 = 4$). Бу эса, қобикқа таъсир қилувчи электр майдони мавжуд бўлмаганда чўзувчи кучлар, яъни магнит майдони индукцияси (B_s^+) тангенциал ташкил этувчиси ва Лоренц кучи (ρF_s^{\wedge}) тангенциал ташкил этувчилари нолга тенг эканлиги билан тушунтирилади. Бу ҳолда қобик эгилишга нисбатан янада мойилроқ ва юпқа бўлади. Магнит майдонининг ($B_z = 0$) мавжуд бўлмаслиги ҳам кўчишнинг ортишига олиб келади.

Ортотроп конуссимон қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига қалинликнинг ўзгариш таъсири тадқиқ қилинган. Қобик контурларининг маҳкамланиш шартлари қуйидагича танланган: $s = s_0$ кичик радиусли контур шарнирли маҳкамланган ва вақт бўйича ўзгарувчан B_z магнит индукцияси берилади, иккинчи $s = s_N$ контур эса, магнит индукцияси нолга тенг бўлганда меридионал йўналишда эркин. Қобик қалинлигининг ўзгаришидан боғлиқ равишда ортотроп қобикнинг ҳолати тадқиқ қилинган. Ўзгарувчан қалинликли $h = 5 \cdot 10^{-4} (1 - \alpha \frac{s}{s_N})$ бериллийдан ясалган ортотроп конус учун масала меридионал йўналишда қалинликнинг ўзгаришини тавсифлайдиган $\alpha = \{0.2; 0.3; 0.4; 0.5\}$ параметрнинг ҳар хил қийматларида ҳисобланган. α параметр қийматининг ошиши кўчиш, қобик $\sigma_{22}^{\pm}(s)$ айланма кучланишлари, $T_{22}^+(s)$ максвелл кучланишлари ва бошқаларнинг ошишига олиб келиши қонуниятини ўрнатилган. Қалинликнинг ўзгариши қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига сезиларли таъсир кўрсатиши ва буни амалий масалаларни ҳисоблашларда ҳисобга олиш зарурлиги олинган натижалардан кўринади.

Қобик контурлари маҳкамланиши ҳар хил бўлганда, ўзгарувчан қалинликли, бериллийдан ясалган юпқа тоқташувчи ортотроп конуснинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати тадқиқ қилинган. Қобик контурларининг маҳкамланиш чегаравий шартлари кўчишлар, кесувчи кучлар ва эгувчи моментлар, Лоренц кучлари, магнит индукцияси ва электр майдони кучланганликлари қийматларига ва тақсимланишларига муҳим таъсир кўрсатиши олинган натижалардан кўринади. Кўчиш ва эгувчи моментлар, Лоренц кучлари, магнит индукцияси ва электр майдони кучланганликларининг максимал қийматлари “сирпанувчи-шарнир” чегаравий шартда пайдо бўлиши аниқланган. Қобик контурлари шарнирли маҳкамланиб, чап контурда магнит индукцияси ва электр майдони кучланганлиги берилган ҳолда сонли ечимлар олинган. Қобикнинг чап контурида магнит индукцияси бор бўлган ҳолда кўчишлар, эгувчи моментлар, Лоренц кучлари, магнит индукцияси, электр майдони кучланганликлари қийматлари чап контурда электр майдони бор бўлгандаги ҳол билан таққосланганда сезиларли катта бўлиши қонуниятини ўрнатилган. Олинган натижалардан келиб чиққан ҳолда, чегаравий шартларнинг механик ва электромагнит майдонларининг ўзаро-

боғлиқлигига таъсири ҳақида фикр юритишимиз мумкин. Масала геометрик чизиқлимас қўйилганда ортотроп қобик кучланганлик ҳолатига ташқи магнит индукциясининг таъсири таҳлил қилинган. Ўзгарувчан қалинликли бериллийдан ясалган ортотроп кесик конуссимон қобик $P_{\zeta} = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ H} / \text{m}^2$ механик куч, $J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^5 \sin \omega t \text{ A} / \text{m}^2$ ташқи бегона электр токи ва $B_{S_0} = 0.1 \text{ Тл}$ ташқи магнит майдони таъсирлари остида жойлашган ҳамда қобик чекли $\sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ ортотроп электрўтказувчанлик хоссасига эга. Бу ҳолда қобикқа пондеромотор Лоренц кучи, ташқи магнит майдони ва механик кучлардан ташкил топган биргаликдаги юкланиш таъсир қилади. Масала қуйидаги чегаравий шартларда ечилган: $s = s_0$ кичик радиусли контур шарнирли маҳкамланган ва вақт бўйича ўзгарувчан B_{ζ} магнит индукцияси берилади, иккинчи $s = s_N$ контур эса, магнит индукцияси нолга тенг бўлганда меридионал йўналишда эркин. Ташқи магнит индукцияси $B_{\zeta 0}$ нормал ташкил этувчисининг ўзгаришидан боғлиқ равишда ортотроп қобикнинг ҳолати тадқиқ қилинган. Магнит индукцияси ташқи нормал ташкил этувчисининг ўзгариши билан, қобик кучланганлик ҳолати ва унинг электромагнит майдонида муҳим ўзгаришлар содир бўлиши кўрсатилган. Магнит индукциясининг ошиши билан қобикнинг эгилиши ошиши аниқланган. Ташқи магнит майдони индукциясининг ошиши қобик механик кучланиши микдорининг ошишига олиб келади. Қобик ички магнит майдони индукцияси микдорининг ўзгариши, ташқи магнит майдонининг ўзгариши ва ортотроп электрўтказувчанликлардан боғлиқ равишда тадқиқ қилинган. Ташқи магнит майдони индукцияси оширилганда ички магнит майдони индукцияси ҳам ошиши қонунияти ўрнатилган. Бу эса, қобикда содир бўладиган ҳақиқий физик жараёнларга мос келади ва ўз навбатида олинган натижаларнинг ишончлилигини тасдиқлайди.

Ўзгарувчан қалинликли ортотроп конуссимон қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати ташқи бегона токнинг ўзгаришидан боғлиқ равишда тадқиқ қилинган. Бериллийдан ясалган қобик $P_{\zeta} = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ H} / \text{m}^2$ механик куч, $J_{\theta CT} = J_{\theta CT} \sin \omega t \text{ A} / \text{m}^2$ ($J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^5, 5 \cdot 10^7, -8 \cdot 10^5, -1 \cdot 10^8$) ташқи бегона электр токлари ва $B_{S_0} = 0.1 \text{ Тл}$ ташқи магнит майдони таъсирлари остида жойлашган, ҳамда қобик чекли $\sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ ортотроп электрўтказувчанлик хоссасига эга. Қаралаётган ҳолда бериллийнинг солиштирма электр қаршилиги анизотропияси $\eta_3 / \eta_1 = 4.07$ тенг. Масала қуйидаги чегаравий шартларда ечилган: $s = s_0$ кичик радиусли контур шарнирли маҳкамланган ва вақт бўйича ўзгарувчан B_{ζ} магнит индукцияси берилади, иккинчи $s = s_N$ контур эса, магнит индукцияси нолга тенг бўлганда меридионал йўналишда эркин. Ортотроп электрўтказувчанликни ҳисобга олиб, ташқи бегона токнинг йўналиши ва зичлиги микдорини танлаган ҳолда ностационар электромагнит ва механик майдонлар таъсирлари остида жойлашган қобикнинг кучланганлик ҳолатини оптималлаштириш мумкинлиги кўрсатилган. Ташқи бегона

электр токи қийматининг ошиши қобикнинг кучланиши ва кўчиши, Лоренц кучи нормал ва тангенциал ташкил этувчилари қийматларининг ошишига олиб келиши аниқланган. Ташқи бегона токнинг йўналиши ўзгартирилганда, пондеромотор кучнинг йўналиши механик юкланиш нормал ташкил этувчиси йўналиши билан мос тушади, бу эса қобикнинг кучланиши ва кўчиши, ҳамда электромагнит майдони параметрларининг сон ва сифат ўзгаришларига олиб келади. Шундай қилиб, ташқи бегона электр токининг зичлиги миқдори ва йўналишини танлаб, қобикда кучланиш ва кўчиш қийматларини минималлаштиришга эришиш мумкин. Келтирилган ҳисоблашлар натижаларини таҳлил қилиб, улар электромагнит ва механик таъсирлар остида жойлашган қобикда содир бўладиган механик ва физик жараёнлар тўғрисидаги тасаввурларга қарама-қарши эмаслигини таъкидлаб ўтамыз.

ХУЛОСА

1. Анизотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи қобиклар магнитоэластиклиги боғлиқли динамик масалаларининг математик қўйилиши шакллантирилган.

2. Масала геометрик чизиклимас қўйилганда ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи ортотроп қобиклар магнитоэластиклигининг икки ўлчамли чизиклимас модели яратилган. Бунда қобик материалининг ортотроплик хоссаси бош йўналишлари мос координата ўқларининг йўналишлари билан мос тушади, шунингдек, ортотроп жисм магнит ва электрик хоссаларига нисбатан чизикли деб фараз қилинган.

3. Пластинка ва қобиклар геометрик чизиклимас назариясининг квадратик варианты асосида, ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ностационар механик ва электромагнит юкланишлар таъсирлари остида жойлашган, ихтиёрий меридианли юпка ток ташувчи ортотроп айланма қобикнинг деформацияланишини ифодалайдиган магнитоэластикликнинг чизиклимас дифференциал тенгламалари боғлиқли ҳал қилувчи системаси ҳосил қилинган.

4. Масала чизиклимас қўйилганда ортотроп электр ўтказувчанлик, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликларни ҳисобга олган ҳолда, ток ташувчи ортотроп айланма қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилиш имконини берадиган магнитоэластикликнинг боғлиқли янги синф масалаларини сонли ечиш услубияти ва алгоритмлари ишлаб чиқилган. Ишлаб чиқилган услубиятга асосланган ҳолда, механик кучлар, ташқи бегона ток ва ташқи магнит майдонлари таъсирлари остида жойлашган, изотроп ток ташувчи халқавий пластинка ва конуссимон қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатлари ҳисоби ўтказилган. Вақт бўйича қадамнинг камайиши ва таъсир этувчи кучларнинг давомийлигининг ўсиши билан, ҳар хил қадамларда кўчиш ва кучланишлар қийматлари ўртасидаги фарқнинг сезиларли бўлмаган даражада ўсиши натижаларни таққослардан келиб чиқади. Тўртинчи ва бешинчи тақрибий олинган сонли маълумотлар деярли устма-уст тушади, бу эса итерацион жараён яқинлашиш шартининг қаноат-

лантирилиши ҳақида гувоҳлик беради. Изотроп ҳолда бошқа муаллифлар олган маълумотлар билан таққослашлар натижалари тақлиф этилган ёндешувнинг ортотроп электр ўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда, юпқа ток ташувчи ортотроп айланма қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилишда қўлланилиши мумкинлигини кўрсатади.

5. Ортотроп қобикнинг чизиклимас ҳолатига конусликнинг таъсирини ҳисобга олиш масаласи қаралган. Магнит индукцияси ва кесувчи кучларнинг ўзаро таъсири кўчиш ва механик кучланиш, электр майдони кучланганлиги ва магнит индукцияси экстримал қийматларини пайдо қилиши аниқланган. Магнит индукцияси ва кесувчи куч қобикнинг чап контурида берилади (чегаравий шартлар), бунда кесувчи зўриқиш ва магнит индукциясининг нормал ташкил этувчиси қарама-қарши йўналган. Конуслик бурчагининг камайиши билан кўчиш ва механик кучланиш, электр майдони кучланганлиги ва магнит индукцияси абсолют қийматларининг ўсиш қонунияти ўрнатилган. Бу далил электромагнит ва механик майдонларнинг ўзаро боғлиқлигини намойиш қилади. Олти градусга тенг конуслик бурчаги қаралган геометрик чизиклимас қобик учун танлаб олинган юкланишларда критик эканлиги аниқланган. Конуслик бурчагини янада камайтириш қобик турғунлигини йўқотишига олиб келади.

6. Токташувчи бериллийдан ясалган ортотроп конус ва токташувчи алюминийдан ясалган изотроп конус ҳамда магнит майдони ва ташқи бегона ток мавжуд бўлмаганда алюминийдан ясалган изотроп конуслар учун олинган ечимлар натижаларини таққослаш асосида масала чизиклимас қўйилганда, юпқа қобикларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати тадқиқ қилинган. Учала ҳолда ҳам кўчишларнинг тақсимланиши чизиклимасдир ва улар максимал қийматларга қобикнинг чап контурида эришадилар. Шунингдек, бериллийдан ясалган ортотроп конус ва магнит майдонини ҳисобга олиб алюминийдан ясалган изотроп конуслар таққосланганда, кўчиш максимал қийматлари деярли икки мартага фарқ қилади. Конус изотроп бўлиб, магнит ва электр майдонлари таъсирлари бўлмаган ҳолда, кўчишнинг сезиларли ошиши аниқланган. Бу эса, қобикқа таъсир қилувчи электр майдони мавжуд бўлмаганда чўзувчи кучлар, яъни магнит майдони индукцияси тангенциал ташкил этувчиси ва Лоренц кучи тангенциал ташкил этувчилари нолга тенг эканлиги билан тушунтирилади. Масала чизикли ва чизиклимас қўйилганда олинган ечимлар натижалари таққосланган. Конуслик бурчагининг камайиши билан масала чизикли ва чизиклимас қўйилганда олинган ечимлар натижалари ўртасидаги фарқнинг ўсиши қонунияти ўрнатилган. Олинган натижаларни таҳлил қилиб, чизикли назария билан таққослаганда ортотроп қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига геометрик чизиклимасликнинг таъсири ҳақида фикр юритишимиз мумкин.

7. Қалинликлиги ўзгарувчан бўлган бериллийдан ясалган ортотроп конус учун меридионал йўналишда қалинликнинг ўзгаришини тавсифлайдиган “ α ” параметрнинг ҳар хил қийматларида сонли натижалар олинган. “ α ” параметр қийматининг ошиши кўчиш, қобик айланма кучланишлари, максвелл кучланишлари ва бошқа микдорларнинг ошишига олиб келиши

қонунияти ўрнатилган. Қалинликнинг ўзгариши қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига сезиларли таъсир кўрсатиши ва буни амалий масалаларни ҳисоблашларда ҳисобга олиш зарурлиги олинган натижалардан кўринади. Қобик контурларининг маҳкамланиши ҳар хил бўлганда сонли натижалар олинган. Қобик контурларининг маҳкамланиш чегаравий шартлари кўчишлар, кесувчи кучлар ва эгувчи моментлар, Лоренц кучлари, магнит индукцияси ва электр майдони кучланганликлари қийматларига ва тақсимланишларига муҳим таъсир кўрсатиши олинган натижалардан кўринади. Максимал кўчишлар ва эгувчи моментлар, Лоренц кучлари, магнит индукцияси ва электр майдони кучланганликлари “сирпанувчи-шарнир” чегаравий шартда пайдо бўлиши аниқланган. Қобикнинг чап контурида магнит индукцияси бор бўлган ҳолда кўчишлар, эгувчи моментлар, Лоренц кучлари, магнит индукцияси, электр майдони кучланганликлари қийматлари чап контурда электр майдони бор бўлгандаги ҳол билан таққосланганда кўпроқ катта бўлиши қонунияти ўрнатилган. Олинган натижалардан келиб чиққан ҳолда, чегаравий шартларнинг механик ва электромагнит майдонларининг ўзаробоғлиқлигига таъсири ҳақида фикр юритишимиз мумкин.

8. Магнит индукциясининг ошиши билан қобикнинг эгилиши ва кучланиши ошиши қонунияти аниқланган. Ташқи магнит майдони индукцияси оширилганда ички магнит майдони индукцияси ҳам ошиши қонунияти ўрнатилган. Бу эса, қобикда содир бўладиган ҳақиқий физик жараёнларга мос келади ва ўз навбатида олинган натижаларнинг ишончлилигини тасдиқлайди. Ортотроп электрўтказувчанликни ҳисобга олиб, ташқи бегона токнинг йўналиши ва зичлиги миқдорини танлаган ҳолда ностационар электромагнит ва механик майдонлар таъсирлари остида жойлашган қобикнинг кучланганлик ҳолатини оптималлаштириш мумкинлиги кўрсатилган. Ташқи бегона электр токи қийматининг ошиши қобикнинг кучланиши ва кўчишлари, Лоренц кучи нормал ва тангенциал ташкил этувчилари қийматларининг ошишига олиб келиши аниқланган. Шундай қилиб, ташқи бегона электр токининг зичлиги миқдори ва йўналишини танлаб, қобикда кучланиш ва кўчиш қийматларини минималлаштиришга эришиш мумкин.

9. Қаралган масалаларда кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тавсифловчи функциялар қийматлари электромагнит параметрлардан, хусусан ортотроп электрўтказувчанлик ва материалнинг ортотроп хоссаларидан боғлиқ бўлган, майдонларнинг ўзаро боғлиқлик таъсирларини баҳолаш имконини берадиган боғланишлар қурилган. Ҳосил қилинган ортотроп айланма қобик магнитоэластиклиги боғлиқли тенгамалари системасидан фойдаланиш, масала геометрик чизиклимас қўйилганда ортотроп электрўтказувчанликни ҳисобга олган ҳолда, токташувчи қобиклар назариясининг ностационар масалаларини ечиш учун ишлаб чиқилган услубият янги синф масалаларини ечиш имкониятини беради. Бунда конструктив элементларнинг ҳақиқий ишлаш шартлари ва материалнинг ортотроп электрўтказувчанлиги, магнит ва диэлектрик сингдирувчанликлари тўлароқ ҳисобга олинади, бу эса конструкцияларнинг ишлаш мустаҳкамлигини ошириш учун геометрик, механик ва электромагнит параметрларни рационал танлаш имкониятини беради.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК 16.07.2013 Т/ФМ.02.02 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ И
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНДИАМИНОВ РАВШАН ШУКУРОВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ МАГНИТОУПРУГОСТИ
ТОКОНЕСУЩИХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ С УЧЕТОМ
ОРТОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ**

**01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела
(физико-математические науки)**

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Ташкент – 2014

Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № 20.02.2014/B2013.1.FM1.

Докторская диссертация выполнена в Институте механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан и Самаркандском филиале Ташкентского университета информационных технологий.

Полный текст докторской диссертации размещен на веб-странице научного совета 16.07.2013.Т/ФМ.02.02 при Ташкентском государственном техническом университете и Национальном университете Узбекистана по адресу www.tdtu.uz/tadqiqitchi/dis_matn.htm.

Атореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещён на веб-странице по адресу www.tdtu.uz/tadqiqitchi/avr_matn.htm и Информационно-образовательном портале «ZIYONET» по адресу www.ziyonet.uz

**Научные
консультанты:**

Ширинкулов Ташпулат Ширинкулович

доктор технических наук, академик

Мольченко Леонид Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Мардонов Ботиржан Мардонович

доктор физико-математических наук, профессор

Сафаров Исмоил Ибрагимович

доктор физико-математических наук, профессор

Карнаухов Василий Гаврилович

доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая
организация:**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Защита состоится «__» _____ 2014 г. в «__» часов на заседании научного совета 16.07.2013.Т/ФМ.02.02 при Ташкентском государственном техническом университете и Национальном университете Узбекистана по адресу: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел./факс: (99871) 227-10-32, e-mail: tadqiqitchi@tdtu.uz.

Докторская диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета за № 01, с которой можно ознакомиться в ИРЦ (100095, г.Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел. (99871) 227-10-32).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2014 года
(протокол рассылки № _____ от _____ 2014 года).

К.А. Каримов

Председатель научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук д.т.н., профессор

Н.Дж. Тураходжаев

Учёный секретарь научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук к.т.н., доцент

М.М. Мирсаидов

Председатель научного семинара при научном совете
по присуждению ученой степени доктора наук
д.т.н., профессор

АННОТАЦИЯ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность и востребованность темы диссертации. Повышенный интерес к проблемам механики связанных полей, в первую очередь к электромагнитоупругости, обусловлен потребностями современного технического прогресса в различных отраслях промышленности при разработке инновационных технологий. Важное место в механике сопряженных полей занимают вопросы изучения движения сплошной среды с учетом электромагнитных эффектов.

Развитие теории сопряженных полей и, в частности, теории электромагнитного взаимодействия с деформируемой средой считается одним из главных направлений развития современной механики твердого тела. Механизм взаимодействия упругой среды с электромагнитным полем разнообразен и обусловлен геометрическими характеристиками и физическими свойствами рассматриваемого тела. В частности, этот механизм получают некоторые специфические особенности, когда рассматриваем проблемы относительно тонких пластин и оболочек, обладающих анизотропной электропроводностью.

Создание оптимальных конструкций в современной технике связано с вопросами широкого использования конструктивных элементов типа тонкостенных оболочек и пластин с учетом нелинейного взаимодействия, в которых электромагнитные эффекты магнитных полей с телом оболочки и пластины оказываются весьма существенными. Эффекты связанности динамических и механических перемещений электропроводных тел с электромагнитным полем обусловлены пондеромоторными силами Лоренца. Последние зависят от скорости движения элементов проводящей сплошной среды и внешнего магнитного поля, от величины и ориентации тока проводимости относительного внешнего магнитного поля. Значительные эффекты пондеромоторного взаимодействия имеют место для высокочастотных колебаний при больших значениях амплитуд перемещений, импульсных магнитных полей и токонесущих элементов.

Именно для этих условий в первую очередь необходимо развитие математических основ магнитоупругости и прикладных методов решения отдельных классов задач. Среди этих классов задач, прежде всего, отметим задачи для тонкостенных токонесущих анизотропных пластин и оболочек, помещенных в сильное внешнее магнитное поле, а также задачи о нелинейных магнитоупругих колебаниях тонкостенных элементов в магнитном поле.

Учитывая, что специфические магнитоупругие эффекты проявляются при исследовании связанных задач в нелинейной постановке, представляется актуальным развитие численных подходов к решению связанных задач магнитоупругости гибких токонесущих анизотропных пластин и оболочек обладающих анизотропной электропроводностью, находящихся под действием нестационарных электромагнитных и механических нагрузок. При изучении вопросов нелинейной магнитоупругости значительный научный интерес представляет определение напряженно-деформированного состояния

токонесущих пластин и оболочек с учетом анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости, подвергающихся воздействию переменных электромагнитных и механических полей.

Востребованность этих задач и интерес к ним обусловлен широким применением в современной технике в качестве конструктивных элементов тонкостенных оболочек и пластин, находящихся под действием сильных магнитных полей. Эти задачи возникают в современной технике, где такие конструкции используются в качестве ограждающих или несущих элементов для экранирования внешних полей сильномагнитного оборудования. Этот интерес обусловлен также необходимостью и востребованностью решения задач электромагнитной совместимости при разработках современных измерительных систем, устройств вычислительной техники, при измерениях слабых импульсных полей на фоне больших полей, при разработке вопросов защиты обслуживающего персонала от электромагнитного воздействия и др.

Актуальность и востребованность темы диссертации заключается в постановке и решении проблем в соответствии с Законом Республики Узбекистан «Об обеспечении электромагнитной совместимости» (1999 г., № 1, ст. 16; 2003 г., № 5, ст. 67; 2013 г., № 18, ст. 233).

Связанные задачи электромагнитоупругости анизотропных пластин и оболочек обладающих анизотропной электропроводностью представляет научный интерес современности. В случае тонких анизотропных тел с анизотропной электропроводностью можно решать оптимальные задачи магнитоупругости путем вариации всех физико-механических параметров материала тела. В частности, при постоянных механических и геометрических параметрах задачи, с помощью изменения анизотропных электродинамических параметров можно получить конструктивные элементы с качественно новым механическим поведением. В последнее время созданы материалы с новыми электромагнитными свойствами. Эти материалы могут эффективно использоваться в различных областях новой техники при разработке новых технологий.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан № Ф4 «Математика, механика и информатика».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации. В научных центрах, высших образовательных учреждениях США, Германии, Японии, Украины, Армении и других ведутся научно-исследовательские работы по решению проблем нелинейной магнитоупругости теории пластин и оболочек, а по применению численных методов к решению задач теории оболочек в геометрически нелинейной постановке ведутся исследования во Франции, Великобритании, России и других странах мира.

Развитие новейшей современной техники, эксплуатация которой протекает в сложных условиях нагружения при взаимодействия различных физических факторов, стимулировала создание и разработку теории сопряженных полей в упругих телах. Проблемы взаимодействия являются основополагаю-

щими в задачах магнитоупругости и в задачах движения упругих деформируемых электропроводящих тел в магнитном поле. В механике деформируемого твердого тела получили значительно развитие вопросы по изучению эффектов взаимодействия механических полей деформаций с электромагнитными полями.

Степень изученности проблемы. Несмотря на большое число проведенных исследований разработка сложной проблемы взаимодействия тонкостенных элементов типа оболочек и пластин с электромагнитным полем еще далека от завершения.

В большинстве работ взаимодействие упругого тела с электромагнитным полем рассматривается в линейной постановке без учета анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости. Когда материал проводящего упругого тела обладает свойством анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости, то картина взаимодействия полей значительно усложняется. Поэтому создание нелинейной теории магнитоупругого взаимодействия с учетом анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости представляет научный интерес.

Исходя из анализа существующих работ, необходимо отметить, что решение нелинейных связанных задач магнитоупругости токонесущих оболочек обладающих анизотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостью практически отсутствует. Это обусловлено сложностью связанной исходной системы магнитоупругих дифференциальных уравнений в частных производных, отсутствием подходов и алгоритмов решения таких задач.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ отражена в следующих проектах:

фундаментальные научные проекты: ФА-Ф8-Ф089 - «Разработка теоретических основ расчета напряженно-деформированного состояния пластинчатых и оболочечных конструкций и взаимодействующих сред в рамках трехмерной динамической теории упругости» (2007-2011гг.); Ф4-ФК-0-11951- «Разработка методики, алгоритма и программных средств решения нелинейных связанных задач электромагнитоупругости токонесущих анизотропных оболочек с учетом анизотропной электропроводности» (2012-2016 гг.); научный проект № 48-08- «Разработка методов исследования напряженно-деформированного состояния анизотропных пластин и оболочек, взаимодействующих с упругим основанием» фонда поддержки фундаментальных исследований Академии наук Республики Узбекистан (2008-2009гг.).

Целью исследования является развитие теории нелинейной магнитоупругости токонесущих анизотропных тел обладающей анизотропной электропроводностью, математическое моделирование и решение задач магнитоупругости ортотропных оболочек вращения,

Для достижения цели сформулированы следующие **задачи исследования**: формулирование физических положений и математического моделирования магнитоупругого деформирования токонесущих анизотропных тел,

обладающих анизотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостью;

разработка математических основ и прикладных методов теории деформирования, гибких токонесущих оболочек, обладающих анизотропной электропроводностью, находящихся под воздействием нестационарных электромагнитных полей и механических нагрузок;

развитие методики приближенного решения нелинейных краевых задач магнитоупругости токонесущих оболочек вращения, обладающих ортотропной электропроводностью, переменной в двух координатных направлениях жесткостью, находящихся под воздействием нестационарных как электромагнитных, так и механических сил;

получение связанных разрешающих систем нелинейных дифференциальных уравнений магнитоупругости гибких токонесущих ортотропных оболочек вращения, обладающих ортотропной электропроводностью, находящихся под нестационарным воздействием;

разработка эффективного подхода к численному решению связанных динамических задач магнитоупругости ортотропных оболочек вращения в нелинейной постановке;

проведение анализа электромагнитных эффектов и напряженно-деформированного состояния указанных тел в широком диапазоне изменения геометрических, механических и электромагнитных параметров.

Объектом исследования является магнитоупругое поведение токонесущих анизотропных тел, обладающих анизотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостью.

Предмет исследования - развитие математических моделей и методов решения задач магнитоупругости для исследования взаимосвязи механических и электромагнитных полей в электропроводящих телах, обладающих анизотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостью.

Методы исследований. В процессе исследования применены методы линеаризации и устойчивого численного метода дискретной ортогонализации.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

впервые сформулирована математическая постановка связанной динамической задачи магнитоупругости токонесущих оболочек с учетом анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости в геометрической нелинейной постановке;

впервые построена нелинейная двумерная модель магнитоупругости токонесущих ортотропных оболочек с учетом конечной ортотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости;

получена разрешающая система уравнений, описывающая несимметричную деформацию гибких проводящих оболочек вращения обладающих ортотропной электропроводностью, переменной в двух координатных

направлениях жесткостью, находящихся под воздействием нестационарных как электромагнитных, так и механических сил;

получена связанная разрешающая система нелинейных дифференциальных уравнений магнитоупругости гибких токонесущих ортотропных оболочек вращения произвольного меридиана, с учетом ортотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости, находящихся под нестационарным воздействием;

впервые разработаны методика и алгоритм решения связанных динамических задач магнитоупругости ортотропных оболочек вращения с учетом конечной ортотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости в нелинейной постановке;

выявлены новые эффекты, обусловленные связанностью механических полей деформаций с электромагнитными полями с учетом конечной ортотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости;

оптимизировано напряженно-деформированное состояние токонесущей ортотропной оболочки, выбирая направленность и величину плотности стороннего электрического тока с учетом ортотропной электропроводности.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

получены новые эффекты взаимодействия проводящих упругих тел с электромагнитными полями, учет которых будет полезен при решении многочисленных практических задач в различных областях новой техники;

на основании полученных уравнений, с использованием разработанной в работе методики получим возможность учитывать как анизотропию материала, так и анизотропию внутреннего электромагнитного поля оболочки, что является практическим значением проведенной работы;

построены зависимости значений характерных функций напряженно-деформированного состояния от электромагнитных параметров, в частности от ортотропной электропроводности и от ортотропии свойств материала, позволяющие на практике оценить влияние взаимосвязанности полей.

Достоверность полученных результатов обосновывается корректностью постановки краевых задачи, строгостью математических выкладок, использованием обоснованных методов решения и оценки точности решений, сопоставлением с решением задач в другой математической постановке.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования. Теоретическая значимость полученных результатов исследования работы состоит в том, что они вносят важный вклад в развитие теории нелинейной магнитоупругости, теории тонких оболочек.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработаны методика и алгоритм для расчета и оптимизации напряженно-деформированного состояния, гибких токонесущих ортотропных оболочек вращения обладающих электропроводностью в широком диапазоне изменения их параметров при различных условиях закрепления их краев, находящихся под действием нестационарных силовых и электромагнитных полей. Взаимодействие магнитной индукции и перерезывающей силы вызывает появление экстремальных значений. Выявлено, что угол раствора конуса равный шести граду-

сам оказался критическим для рассматриваемой геометрически нелинейной оболочки при подобранных нагрузках. Дальнейшее уменьшение приводит к потере устойчивости оболочки. Установлено, что с уменьшением угла конусности абсолютные величины прогиба и механических напряжений, напряженности электрического поля и магнитной индукции возрастают. Этот факт иллюстрирует взаимосвязь электромагнитных и механических полей.

Произведена оценка влияния стороннего электрического тока на напряженно-деформированное состояние ортотропной оболочки при известных параметрах внешнего магнитного поля и поверхностной механической нагрузки. Показано, что, подбирая величину плотности и направленности стороннего тока с учетом ортотропной электропроводности можно оптимизировать напряженное состояние оболочки, находящейся под воздействием нестационарных электромагнитных и механических полей.

Внедрение результатов исследования. Полученные теоретические результаты использовались при развитии нелинейной теории деформирования анизотропных пластин и оболочек, находящихся под воздействием нестационарных электромагнитных и механических нагрузок в рамках научных проектов: ФА-Ф8-Ф089- «Разработка теоретических основ расчета напряженно-деформированного состояния пластинчатых и оболочечных конструкций и взаимодействующих сред в рамках трехмерной динамической теории упругости» выполненных в Институте механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан (Заключение Комитета по координации развития науки и технологий при Кабинете Министров Республики Узбекистан от 26.06.2007г.); № 48-08 «Разработка методов исследования напряженно-деформированного состояния анизотропных пластин и оболочек, взаимодействующих с упругим основанием» выполненных в Институте механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики Узбекистан (Решения совета Фонда поддержки фундаментальных исследований Академии наук Республики Узбекистан от 18.01.2008 г.).

Апробация работы. Результаты исследования доложены на 25 научно-практических конференциях, в том числе 20 международных конференциях:

The 5 th Interational Conference on «European Science and Technology» (Munich, 2013); XI-Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2011); XI и XII - Международных научных конференциях «Сучасні проблеми природничих наук та проблеми підготовки фахівців в цій галузі» (Николаев, 2007, 2009); Международная научно-техническая конференция «Вычислительная механика деформируемого твердого тела» (Москва, 2006) и др.

Основные результаты диссертационной работы докладывалась и обсуждалась на научных семинарах: кафедры «Механики сплошных сред» Киевского Национального университета им. Т.Г.Шевченко (Киев, 2006-2009); отдела термоупругости Института механики им. С.П.Тимошенко Национальной Академии наук Украины (Киев, 2009); лаборатории «Динамика пространственных систем» Института механики и сейсмостойкости соору-

жений Академии наук Республики Узбекистан (Ташкент, 2005-2011); объединенном городском научном семинаре «Механики деформируемого твердого тела» при Самаркандского государственного архитектурно строительного им. М.Улугбека (Самарканд, 2008); кафедры теоретической и прикладной механики Национального Университета Узбекистана (Ташкент, 2010); на объединенном научном семинаре кафедр «Информационные технологии», «Компьютерные системы», «Естественные науки» Самаркандского филиала Ташкентского университета информационных технологий (Самарканд, 2013); на научном семинаре по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела» при Научном совете 16.07.2013.Т/FM.02.02. при Ташкентском государственном техническом университете им. Абу Райхана Беруни и Национальном Университете Узбекистана (Ташкент, 2014).

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 51 научных трудов, в том числе 12 научных статей в международных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, 9 приложений и содержит 200 страниц текста, включает 110 рисунков, 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность и востребованность темы диссертации, формулируются цель и задачи, а также объект и предмет исследования, приводится соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, обосновывается достоверность полученных результатов, раскрывается теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведен список внедрений в практику результатов исследования, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации приводится международный обзор научных исследований по теме диссертации, посвященных проблеме взаимодействия электромагнитного поля с деформируемой средой, подходам к решению задач магнитоупругости теории пластин и оболочек в геометрически нелинейной постановке.

Значительный вклад в развитие определенных направлений электромагнитоупругости внесли С.А. Амбарцумян, А.И. Ахиезер, Г.Е. Багдосарян, М.В. Белубекян, Я.И. Бурак, К.Б. Власов, А.С. Вольмир, Б.П. Галапац, А.Р. Гачкевича, Б.М. Гнидец, В.Т. Гринченко, Л.А.Ильюшин, Б.И. Колодий, В.Ф. Кондрат, Я.И. Лопушанский, В.З. Паргон, Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Я.С. Подстригач, Л.И.Седов, А.Н. Гузь, Ф.Г. Махорт, И.Т. Селезов, А.Ф. Улитко, С.А. Калоеров, В.Г. Карнаухов, М.Р. Короткина, Б.А. Кудрявцев, В. Новацкий, Д.И. Бардзокас, П.А. Мкртчян, К.В. Казарян, С.О. Саркисян, W.F. Brown, L. Knopoff, J.W. Dunkin, A.C. Eringen, Mc. Carthy, S. Chattopadhyay, S. Kaliski, P. Chadwick, J.C. Baumaner, H.F. Tigrsten, A.E. Green, P.M. Naghdi, F.C. Moon, G.A. Maugin, R.A. Toupin, H. Parkus, и др.

Проблемам нелинейной магнитоупругости теории пластин и оболочек посвящены работы Я.И. Бурака, А.Р. Гачкевича, Л.В. Мольченко, Р.Ш. Индиаминова, К. Hiroyuki, N. Kikuo, I. Yoshio, T. Nobukazu, G. Nariboli, B.L. Juneja и др. Применению численных методов к решению задач теории оболочек в геометрически нелинейной постановке посвящены работы Н.В. Валишвили, Я.М. Григоренко и его учеников, А.В. Кармишина, М.С. Корнишина, В.А. Постнова и многие другие.

В большинстве работ взаимодействие упругого тела с электромагнитным полем рассматривается без учета анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости. Когда материал проводящего упругого тела обладает свойством анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости, то картина взаимодействия полей значительно усложняется и поэтому создание упрощенной, нелинейной теории магнитоупругого взаимодействия с учетом анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости представляет научный интерес, как с точки зрения теории, так и приложений.

Из обзора следует, что решение нелинейных связанных задач магнитоупругости токонесущих оболочек обладающих анизотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостью практически отсутствует.

Это обусловлено сложностью связанной исходной системы магнитоупругих дифференциальных уравнений в частных производных, отсутствием подходов и алгоритмов решения таких задач, что и определило цель настоящей диссертационной работы.

Во второй главе диссертации формулируются исходные физические и математические положения и соотношения нелинейной магнитоупругости токонесущих оболочек обладающей анизотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостями в трехмерной постановке. Поставлены начальные и граничные условия, необходимые для однозначного решения задачи. Обсуждаются нелинейные связанные задачи магнитоупругости токонесущих анизотропных тел обладающих анизотропной электропроводностью в эйлеровом и лагранжевом представлениях. Осуществляется переход в уравнениях электродинамики к лагранжевым переменным.

Пусть тело находится в магнитном поле, создаваемым как электрическим током в самом теле, так и источником, находящимся вдали от тела. Примем также, что тело служит проводником электрического тока (токонесущее тело), который подводится к торцам тела от внешнего источника. Предполагается, что сторонний электрический ток в невозмущенном состоянии равномерно распределен по телу (плотность тока не зависит от координат). Тело обладает конечной электропроводностью и не обладает свойством самовольной поляризации и намагничиваемости.

Определим величины и запишем уравнения, которые характеризуют среды электромагнитные поле. Пусть электромагнитное поле тела в эйлеровой системе координат характеризуется вектором напряженности электрического поля \vec{e} , вектором напряженности магнитного поля \vec{h} ,

вектором электрической индукции \vec{d} и вектором магнитной индукции \vec{b} , а в лагранжевой системе координат характеризуется соответственно $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}$ и \vec{B} . Осуществим переход от эйлеровой системы координат \vec{x} к лагранжевой $\vec{\xi}$ с помощью зависимостей:

$$\begin{aligned} \rho &= \Gamma \rho^*; \quad \vec{E} = F^T \vec{e}; \quad \vec{H} = F^T \vec{h}; \\ \vec{D} &= \Gamma F^{-1} \vec{d}; \quad \vec{B} = \Gamma F^{-1} \vec{b}; \quad \Gamma \rho = P F^T; \\ \vec{P}_R &= P \vec{n}_R; \quad R_e = \Gamma \rho_e; \quad \vec{J} = \Gamma F^{-1} \vec{j} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Gamma = \det \left| \frac{\vec{x}}{\vec{\xi}} \right|$, $F = \frac{\partial x_i}{\partial \xi_j}$ ($i, j = 1, 2, 3$).

В этом случае, уравнения магнитоупругости для анизотропных тел в лагранжевых переменных, в области, занимаемой телом (внутренняя область), запишутся следующим образом:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_{cm}; \quad \text{div } \vec{B} = 0, \quad \text{div } \vec{D} = 0; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho (\vec{f} + \vec{f}^\wedge) + \text{div } \vec{\alpha} \quad (3)$$

где \vec{J}_{cm} – плотность стороннего электрического тока, \vec{f} – объемная сила, \vec{f}^\wedge – объемная сила Лоренца, \vec{J} – плотность электрического тока, $\vec{\alpha}$ – тензор внутренних напряжений.

Систему уравнений магнитоупругости необходимо замкнуть соотношениями, связывающим векторы напряженности и индукции электромагнитного поля, а также законам Ома, определяющим плотность тока проводимости в подвижной среде. Если анизотропное тело линейно относительно магнитных и электрических свойств, то определяющие уравнения для электромагнитных характеристик поля и кинематическое уравнение для электропроводности, а также выражения для сил Лоренца, с учетом стороннего тока \vec{J}_{cm} в переменных Лагранжа запишутся соответственно в виде:

$$\vec{B} = \mu_{ij} \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon_{ij} \vec{E}, \quad (4)$$

$$\vec{J} = \sigma_{ij} \Gamma F^T F^{-1} [\vec{J}_{cm} + \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}], \quad (5)$$

$$\rho \vec{f}^\wedge = \Gamma^{-1} F^{-1} [\vec{J}_{cm} \times \vec{B} + \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}]. \quad (6)$$

Здесь $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \mu_{ij}$ – соответственно тензоры электрической проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемости линейно анизотропного токонесущего тела ($i, j = 1, 2, 3$). Для однородных анизотропных сред они являются симметричными тензорами второго ранга.

Таким образом, (2), (3) вместе с соотношениями (4)–(6) составляет замкнутую систему нелинейных уравнений магнитоупругости токонесущих анизотропных тел, обладающих анизотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостью в лагранжевой формулировке.

В третьей главе диссертации построено геометрически нелинейной модел двумерной теории токонесущих оболочек обладающей ортотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостями.

Рассматриваются гибкие токонесущие оболочки переменной толщины, конечной проводимости, без учета эффектов поляризации и намагничивания, а также температурных напряжений. Упругие свойства материала оболочки считаются ортотропными, главные направления упругости которого совпадают с направлениями соответствующих координатных линий. Материал подчиняется обобщенному закону Гука, и имеет конечную электропроводность. Электромагнитные свойства материала токонесущей оболочки характеризуются тензорами электрической проводимости σ_{ij} , магнитной проницаемости μ_{ij} , диэлектрической проницаемости ε_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$). При этом, исходя из кристаллофизики, для рассматриваемого класса проводящих сред с ромбической кристаллической структурой считалось, что тензоры $\sigma_{ij}, \mu_{ij}, \varepsilon_{ij}$ принимают диагональный вид. Координатную поверхность токонесущей ортотропной оболочки в недеформированном состоянии отнесем к криволинейной ортогональной системе координат α, β, z , считая, что координатные линии срединной поверхности оболочки совпадают с линиями главных кривизн.

Используя гипотезу Кирхгофа-Лява и адекватные ей электромагнитные гипотезы, получена с помощью принципа виртуальных перемещений приближенная двумерная система связанных нелинейных уравнений магнитоупругости ортотропных токонесущих оболочек с учетом ортотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости. Решение данной системы, исходя из специфики задач, необходимо искать совместно с уравнениями электродинамики для вакуума, т.е. решать внешнюю задачу.

Данная проблема в нелинейной постановке в настоящее время практически неразрешима. В конкретных случаях исследуемая задача может допускать различные упрощения. Считая известным характер распределения и изменения во времени магнитного поля на поверхностях ортотропной оболочки, можно ограничиться рассмотрением только внутренней задачи. В качестве гипотез магнитоупругости анизотропных пластин и оболочек выбираем:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_1(\alpha, \beta, t); E_2 = E_2(\alpha, \beta, t); E_3 = \frac{\partial u_2}{\partial t} B_1 - \frac{\partial u_1}{\partial t} B_2; \\ J_1 &= J_1(\alpha, \beta, t); J_2 = J_2(\alpha, \beta, t); J_3 = 0; \\ H_1 &= \frac{1}{2}(H_1^+ + H_1^-) + \frac{z}{h}(H_1^+ - H_1^-); H_2 = \frac{1}{2}(H_2^+ + H_2^-) + \frac{z}{h}(H_2^+ - H_2^-); H_3 = H_3(\alpha, \beta, t). \end{aligned} \quad (7)$$

где u_i – компоненты вектора перемещений точек оболочки; E_i, H_i – компоненты векторов напряженности электрического и магнитного полей оболочки; J_i – компоненты вихревого тока; H_i^\pm – тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля на поверхностях оболочки; h – толщина оболочки.

В дальнейшем, используя граничные условия на поверхности оболочки, полученные гипотезы и решение начальной статической задачи,

определено приближенное распределение внешнего магнитного поля на поверхностях ортотропной оболочки:

$$B_{\alpha}^{\pm} = B_{\alpha o}^{\pm} + B_{\alpha o} - (B_{z o} - B_z)\theta_{\alpha}; B_{\beta}^{\pm} = B_{\beta o}^{\pm} + B_{\beta o} - (B_{z o} - B_z)\theta_{\beta}. \quad (8)$$

Здесь через $B_{\alpha o}^{\pm}$, $B_{\beta o}^{\pm}$ – обозначены компоненты магнитной индукции начального собственного магнитного поля, обусловленные сторонним электрическим током; $B_{\alpha o}$, $B_{\beta o}$, $B_{z o}$ – компоненты внешнего магнитного поля, полученные из решения задачи статики; B_z – нормальная составляющая магнитной индукции оболочки; θ_{α} и θ_{β} – углы поворота нормали.

Используя граничные условия (8), в дальнейшем получаем возможность, учитывать изменение напряженности магнитного поля на поверхностях ортотропной оболочки, обладающих ортотропной электропроводностью в процессе её деформирования.

Настоящая двумерная модель магнитоупругости тонких оболочек обладающей ортотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостями построена в квадратичном приближении, а в выражениях для сил Лоренца учитывается кубическая нелинейность. Это объясняется тем, что в таких задачах при конечных деформациях нелинейные эффекты являются определяющими и действие электромагнитного поля на поле деформаций происходит в основном посредством этих сил. Используя допущение о малости деформаций и углов поворота, показано равенство электромагнитных величин в эйлеровом и лагранжевом представлениях. Полученная двумерная система уравнений представляет собой связанную нелинейную систему дифференциальных уравнений десятого порядка гипербола-параболического типа с переменными коэффициентами, отнесенная к недеформированной поверхности. На основании полученных результатов, в качестве исходных соотношений, описывающих напряженно-деформированное состояние токнесущих ортотропных оболочек указанного класса, принимаем следующую замкнутую связанную систему уравнений:

уравнения движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha}(BN_{\alpha}) - N_{\beta} \frac{\partial B}{\partial \alpha} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \beta}(A^2 S) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{AH}{R_{\alpha}} \right) + \frac{1}{R_{\beta}} \frac{\partial A}{\partial \beta} H + \frac{AB}{R_{\alpha}} Q_{\alpha} + AB(p_{\alpha} + n_{\alpha} + \rho f_{\alpha}^{\wedge}) &= AB\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial}{\partial \beta}(AN_{\beta}) - N_{\alpha} \frac{\partial A}{\partial \beta} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \alpha}(B^2 S) + \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{BH}{R_{\beta}} \right) + \frac{1}{R_{\alpha}} \frac{\partial B}{\partial \alpha} H + \frac{AB}{R_{\beta}} Q_{\beta} + AB(p_{\beta} + n_{\beta} + \rho f_{\beta}^{\wedge}) &= AB\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial}{\partial \alpha}(BQ_{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial \beta}(AQ_{\beta}) - AB \left(\frac{N_{\alpha}}{R_{\alpha}} + \frac{N_{\beta}}{R_{\beta}} \right) + AB(p_z + n_z + \rho f_z^{\wedge}) &= AB\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \beta}(A^2 H) + \frac{\partial}{\partial \alpha}(BM_{\alpha}) - \frac{\partial B}{\partial \alpha} M_{\beta} - AB Q_{\alpha} - AB \left(N_{\alpha} - \frac{1}{R_{\beta}} M_{\beta} \right) \theta_{\alpha} - ABS \theta_{\beta} = AB \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \theta_{\alpha}}{\partial t^2};$$

$$\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \alpha}(B^2 H) + \frac{\partial}{\partial \beta}(AM_{\beta}) - \frac{\partial A}{\partial \beta} M_{\alpha} - AB Q_{\beta} - AB \left(N_{\beta} - \frac{1}{R_{\alpha}} M_{\alpha} \right) \theta_{\beta} - ABS \theta_{\alpha} = AB \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \theta_{\beta}}{\partial t^2};$$

уравнения электродинамики

$$-\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{1}{AB} \left(\frac{\partial(BE_{\beta})}{\partial \alpha} - \frac{\partial(AE_{\alpha})}{\partial \beta} \right);$$

$$\begin{aligned}\sigma_1 \left[E_\alpha + \frac{\partial v}{\partial t} B_z - 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\beta^+ + B_\beta^-) \right] &= \frac{1}{B} \left(\frac{\partial H_z}{\partial \beta} - \frac{B(H_\beta^+ - H_\beta^-)}{h} \right); \\ \sigma_2 \left[E_\beta - \frac{\partial u}{\partial t} B_z + 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) \right] &= \frac{1}{A} \left(-\frac{\partial H_z}{\partial \alpha} + \frac{A(H_\alpha^+ - H_\alpha^-)}{h} \right);\end{aligned}\quad (10)$$

связь между деформациями и перемещениями

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\alpha\alpha} &= \frac{1}{A} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} v + \frac{w}{R_\alpha} + \frac{1}{2} \theta_\alpha^2; \quad \varepsilon_{\beta\beta} = \frac{1}{B} \frac{\partial v}{\partial \beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} u + \frac{w}{R_\beta} + \frac{1}{2} \theta_\beta^2; \\ \varepsilon_{\alpha\beta} &= \frac{A}{B} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{u}{A} \right) + \frac{B}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{v}{B} \right) + \theta_\alpha \theta_\beta; \quad \chi_{\alpha\alpha} = \frac{1}{A} \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \theta_\beta; \quad \chi_{\beta\beta} = \frac{1}{B} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial \beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \theta_\alpha; \\ 2\chi_{\alpha\beta} &= \frac{1}{A} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial \alpha} + \frac{1}{B} \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial \beta} - \frac{1}{AB} \left(\frac{\partial A}{\partial \beta} \theta_\alpha + \frac{\partial B}{\partial \alpha} \theta_\beta \right) + \frac{1}{R_\alpha} \left(\frac{1}{B} \frac{\partial u}{\partial \beta} - \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} v \right) + \frac{1}{R_\beta} \left(\frac{1}{A} \frac{\partial v}{\partial \alpha} - \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} u \right); \\ \text{где } \theta_\alpha &= -\frac{1}{A} \frac{\partial w}{\partial \alpha} + \frac{u}{R_\alpha}; \quad \theta_\beta = -\frac{1}{B} \frac{\partial w}{\partial \beta} + \frac{v}{R_\beta};\end{aligned}\quad (11)$$

соотношения упругости

$$\begin{aligned}N_\alpha &= \frac{e_\alpha h}{1 - \nu_\alpha \nu_\beta} (\varepsilon_{\alpha\alpha} + \nu_\beta \varepsilon_{\beta\beta}); \quad N_\beta = \frac{e_\beta h}{1 - \nu_\alpha \nu_\beta} (\varepsilon_{\beta\beta} + \nu_\alpha \varepsilon_{\alpha\alpha}); \quad S = g_{\alpha\beta} h \varepsilon_{\alpha\beta}; \quad H = g_{\alpha\beta} \frac{h^3}{12} 2\chi_{\alpha\beta}; \\ M_\alpha &= \frac{e_\alpha h^3}{12(1 - \nu_\alpha \nu_\beta)} (\chi_{\alpha\alpha} + \nu_\beta \chi_{\beta\beta}); \quad M_\beta = \frac{e_\beta h^3}{12(1 - \nu_\alpha \nu_\beta)} (\chi_{\beta\beta} + \nu_\alpha \chi_{\alpha\alpha});\end{aligned}\quad (12)$$

где $\nu_\alpha = \nu_{\beta\alpha}$; $\nu_\beta = \nu_{\alpha\beta}$; $e_\alpha \nu_\beta = e_\beta \nu_\alpha$.

Здесь N_α, N_β – нормальные тангенциальные усилия в сечениях $\alpha = \text{const}$ и $\beta = \text{const}$; S – сдвигающее усилие; Q_α, Q_β – перерезывающие усилия; M_α, M_β – изгибающие моменты; H – скручивающий момент; u, v, w – компоненты вектора перемещений; $\varepsilon_{\alpha\alpha}, \varepsilon_{\beta\beta}, \varepsilon_{\alpha\beta}$ – тангенциальные деформации удлинения и сдвига; $\chi_{\alpha\alpha}, \chi_{\beta\beta}, \chi_{\alpha\beta}$ – изгибные деформации и кручение; e_α, e_β – модули упругости по направлениям α, β – соответственно; R_α, R_β – радиусы кривизн; A, B – коэффициенты Ламе; ν_α, ν_β – коэффициенты Пуассона; $h = h(\alpha, \beta)$ – толщина оболочки, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные компоненты тензора удельной электропроводности. Через $\rho f_\alpha^\wedge, \rho f_\beta^\wedge, \rho f_z^\wedge$ представлены значения проекций пондеромоторной силы на координатные оси:

$$\begin{aligned}\rho f_\alpha^\wedge &= -h J_{\beta CT} B_z + \sigma_1 h \left\{ E_\beta B_z + 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) B_z - \frac{\partial u}{\partial t} B_z^2 + \right. \\ &+ \frac{\partial v}{\partial t} \left[0.25 (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) (B_\beta^+ + B_\beta^-) + \frac{1}{12} (B_\alpha^+ - B_\alpha^-) (B_\beta^+ - B_\beta^-) - (B_\beta^+ + B_\beta^-) B_z \right] + \\ &+ \left. \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial t} \left[(B_\beta^+ - B_\beta^-) B_z + (B_\alpha^+ B_\beta^+ - B_\alpha^- B_\beta^-) \right] \right\}; \\ \rho f_\beta^\wedge &= -h J_{\alpha CT} B_z + \sigma_2 h \left\{ -E_\alpha B_z + 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\beta^+ + B_\beta^-) - \right. \\ &- \frac{\partial v}{\partial t} \left[B_z^2 + 0.5 (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) B_z + 0.25 (B_\beta^+ + B_\beta^-)^2 B_z + \frac{1}{12} (B_\beta^+ - B_\beta^-)^2 \right] + \\ &+ \left. \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial t} \left[(B_\alpha^+ - B_\alpha^-) B_z - (B_\beta^+ - B_\beta^-)^2 \right] \right\};\end{aligned}\quad (13)$$

$$\rho f_z^{\wedge} = 0.5 h \left[-J_{\alpha CT} (B_{\beta}^+ + B_{\beta}^-) + J_{\beta CT} (B_{\alpha}^+ + B_{\alpha}^-) \right] + \sigma_3 h \left\{ 0.5 E_{\alpha} (B_{\beta}^+ + B_{\beta}^-) - 0.5 E_{\beta} (B_{\alpha}^+ + B_{\alpha}^-) - \right. \\ \left. - \frac{\partial w}{\partial t} \left[0.25 (B_{\beta}^+ + B_{\beta}^-)^2 + 0.25 (B_{\alpha}^+ + B_{\alpha}^-)^2 + \frac{1}{12} (B_{\beta}^+ - B_{\beta}^-)^2 + \frac{1}{12} (B_{\alpha}^+ - B_{\alpha}^-)^2 \right] + \right. \\ \left. + 0.5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_{\alpha}^+ + B_{\alpha}^-) B_z + 0.5 \frac{\partial v}{\partial t} (B_{\beta}^+ + B_{\beta}^-) B_z + \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_{\alpha}}{\partial t} (B_{\alpha}^+ - B_{\alpha}^-) B_z + \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_{\beta}}{\partial t} (B_{\beta}^+ - B_{\beta}^-) B_z \right\}.$$

Системы уравнений (9)-(13), при условии, что известно распределение напряженности магнитного поля на поверхностях оболочки, составляют полную замкнутую связанную систему нелинейных дифференциальных уравнений магнитоупругости токнесущей ортотропной оболочки обладающей ортотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостями. При получении системы уравнений принято, что действие электромагнитного поля и стороннего тока на поле деформаций происходит посредством сил Лоренца. Замкнутая система уравнений магнитоупругости получена в лагранжевых переменных, отнесенных к недеформированной срединной поверхности ортотропной оболочки в ортогональной криволинейной системе координат.

В четвертой главе диссертации изложена методика решения краевых задач нелинейной магнитоупругости теории токнесущих ортотропных оболочек вращения обладающих ортотропной электропроводностью находящихся под нестационарным воздействием. Предлагаемый подход к численному решению нелинейных задач магнитоупругости теории оболочек основан на последовательном применении конечноразностной схемы Ньюмарка, метода линеаризации и дискретной ортогонализации.

На основе приведенных соотношений и соответствующих гипотез выводится разрешающая связанная система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами, описывающая напряженно деформированное состояние гибких токнесущих оболочек вращения переменной в двух координатных направлениях жесткости. Задачи динамики гибких токнесущих оболочек вращения обладающих ортотропной электропроводностью, переменной в двух координатных направлениях жесткостью находящихся под воздействием нестационарных механических и электромагнитных сил, сведено к нелинейной двумерной краевой задаче. Используя полную систему уравнений, в криволинейной ортогональной системе координат позволяющую математически описать нелинейную двумерную модель магнитоупругости ортотропных оболочек вращения, выводится связанная разрешающая система нелинейных дифференциальных уравнений магнитоупругости гибких токнесущих ортотропных оболочек вращения произвольного меридиана, с учетом ортотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости, находящихся под нестационарным воздействием. При построении разрешающей системы уравнений ортотропной оболочки вращения переменной толщины вдоль образующей, учитывается, что упругие и магнитомеханические характеристики не изменяется вдоль параллели,

предполагается, что все искомые компоненты электромагнитного поля и поля перемещений, входящие в уравнения, не зависят от координаты θ .

В случае исследования напряженно-деформированного состояния ортотропных оболочек вращения произвольной формы, будем исходить из следующих соображений. Во-первых, искомая система уравнений должна описывать весь класс оболочек вращения, включая цилиндрическую оболочку и круглую пластину, во-вторых, она должна быть, представлена в виде, удобном для численного решения задачи, в-третьих, должна допускать формулировку граничных условий в усилиях, моментах, перемещениях и в смешанном виде. Наконец, система дифференциальных уравнений должна быть, записана относительно таких функций, чтобы можно было простейшим образом осуществить условия сопряжения различных оболочек. Исходя из этих соображений, выбираем в качестве разрешающих следующие функции:

$$u_x, u_z, \theta_s, N_x, N_z, M_s, E_\theta, B_\zeta \quad (14)$$

где u_x, u_z – радиальное и осевое перемещения; N_x, N_z – радиальное и осевое усилия; E_θ, B_ζ – напряженность электрического и индукция магнитного полей, которые выражаются через перемещения u, w и усилия N_s, Q_s следующим образом

$$\begin{aligned} N_x &= N_s \cos \varphi + Q_s \sin \varphi; N_z = N_s \sin \varphi - Q_s \cos \varphi; \\ u_x &= u \cos \varphi + w \sin \varphi; u_z = u \sin \varphi - w \cos \varphi. \end{aligned} \quad (15)$$

где φ – угол между нормалью к координатной поверхности и осью вращения. После некоторых преобразований с учетом (14), (15) получаем следующую связанную систему нелинейных дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial s} &= \frac{1 - v_s v_\theta}{e_s h} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \cos \varphi + \frac{v_\theta \cos \varphi}{r} u_x + \frac{1}{R_s} u_z - \sin \varphi \theta_s - \frac{\cos \varphi}{2} \theta_s^2; \\ \frac{\partial u_z}{\partial s} &= \frac{1 - v_s v_\theta}{e_s h} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \sin \varphi + \frac{v_\theta \sin \varphi}{r} u_x - \frac{1}{R_s} u_z + \cos \varphi \theta_s - \frac{\sin \varphi}{2} \theta_s^2; \\ \frac{\partial \theta_s}{\partial s} &= \frac{12(1 - v_s v_\theta)}{e_s h^3} M_s - \frac{v_\theta \cos \varphi}{r} \theta_s; \\ \frac{\partial N_x}{\partial s} &= \frac{\cos \varphi}{r} \left(v_s \frac{e_\theta}{e_s} - 1 \right) N_x + \left(\frac{1}{R_s} + \frac{v_\theta \sin \varphi}{r} \right) N_z + \frac{e_\theta h}{r^2} \cos \varphi u_x - \\ &- \cos \varphi (P_s + \rho F_s^\wedge) - \sin \varphi (P_\zeta + \rho F_\zeta^\wedge) + \rho h \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial N_z}{\partial s} &= -\frac{\cos \varphi}{r} N_z - \frac{1}{R_s} N_x - \sin \varphi (P_s + \rho F_s^\wedge) + \cos \varphi (P_\zeta + \rho F_\zeta^\wedge) + \rho h \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial M_s}{\partial s} &= \frac{\cos \varphi}{r} \left(v_s \frac{e_\theta}{e_s} - 1 \right) M_s + \frac{e_\theta h^3 \cos^2 \varphi}{12 r^2} \theta_s - \cos \varphi N_z + \sin \varphi N_x + \\ &+ (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \theta_s - v_s \frac{e_\theta \sin \varphi}{e_s r} M_s \theta_s - \frac{e_\theta h^3 \cos \varphi \sin \varphi}{12 r^2} \theta_s^2 \\ \frac{\partial B_\zeta}{\partial s} &= -\sigma_2 \mu_3 E_\theta - \frac{(B_s^+ - B_s^-) \mu_3}{\mu_1 h} \end{aligned} \quad (16)$$

$$-\sigma_2 \mu_3 \left[0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) (B_s^+ + B_s^-) - \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_\zeta \right]$$

$$\frac{\partial E_\theta}{\partial s} = -\frac{\partial B_\zeta}{\partial t} - \frac{\cos \varphi}{r} E_\theta.$$

Компоненты пондеромоторной силы Лоренца имеют вид

$$\rho F_s^\wedge = -h J_{\theta cm} B_\zeta + \sigma_1 h [E_\theta B_\zeta + 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) B_\zeta (B_s^+ + B_s^-) - \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_\zeta^2];$$

$$\rho F_\zeta^\wedge = 0.5 h J_{\theta cm} (B_s^+ + B_s^-) + \sigma_3 h \{ -0.5 E_\theta (B_s^+ + B_s^-) - \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) \left[0.25 (B_s^+ + B_s^-)^2 + \frac{1}{12} (B_s^+ - B_s^-)^2 \right] + 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_\zeta (B_s^+ + B_s^-) \}.$$

Здесь под B_s^\pm – понимаем $B_s^\pm = B_{s0}^\pm + B_{s0} - B_{\zeta 0} \theta_s + B_\zeta \theta_s$, где B_{s0}^\pm – компоненты магнитной индукции начального собственного магнитного поля, обусловленные сторонним электрическим током; B_{s0} – компоненты внешнего магнитного поля, полученные из решения задачи статики; B_ζ – нормальная составляющая магнитной индукции оболочки, $h = h(s)$ – толщина оболочки.

Полученная связанная разрешающая система нелинейных дифференциальных уравнений восьмого порядка (16) описывает напряженно-деформированное состояние гибких токонесущих ортотропных оболочек вращения с произвольной формой меридиана, обладающей ортотропной электропроводностью, магнитной и электрической проницаемостью. Составляющие силы Лоренца учитывают скорость деформирования оболочки, внешнее магнитное поле, величину и напряженность тока проводимости относительно внешнего магнитного поля. Учет нелинейности в уравнениях движения вызывает нелинейность в пондеромоторной силе. Добавив к полученной системе уравнений начальные и граничные условия, получим краевую задачу. В векторном виде нелинейная краевая задача имеет вид:

уравнения движения

$$\frac{\partial \vec{N}}{\partial s} = \vec{F} \left(s, t, \vec{N}, \frac{\partial \vec{N}}{\partial t}, \frac{\partial^2 \vec{N}}{\partial t^2} \right), \quad \left(\begin{array}{l} s_0 \leq s \leq s_N, \\ t_0 \leq t \leq t_N \end{array} \right), \quad (18)$$

граничные условия

$$\vec{g}_1(\vec{N}(s_0, t)) = \vec{b}_1^*, \quad \vec{g}_2(\vec{N}(s_N, t)) = \vec{b}_2^*, \quad (19)$$

начальные условия

$$\vec{N} = 0, \quad \frac{\partial \vec{N}}{\partial t} = 0, \quad \text{при } t = 0. \quad (20)$$

Здесь: $\vec{N} = \{u, w, \theta_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\zeta\}^T$ – вектор столбец искомых функций; \vec{F} , \vec{g}_1 , \vec{g}_2 , \vec{b}_1^* , \vec{b}_2^* – в общем случае нелинейные вектор функции.

Решение краевых задач магнитоупругости связано с существенными вычислительными трудностями. Это объясняется тем, что разрешающая система уравнений (16) является системой дифференциальных уравнений гипербола-параболического типа восьмого порядка с переменными коэффи-

циентами. Задачи определения напряженно-деформированного состояния рассматриваемых оболочек при нестационарных механических и магнитных воздействиях, краевая задача (18), (19) решаются для фиксированных моментов времени. Частные производные по временной координате аппроксимируются конечноразностными выражениями неявной схемы Ньюмарка, после применения, которой получаем краевую задачу для системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений в виде

$$\frac{d\vec{N}}{ds} = \vec{F}(s, \vec{N}), \quad (21)$$

и соответствующие граничные условия

$$D_1 \vec{N} \Big|_{s=s_0} = \vec{d}_1; D_2 \vec{N} \Big|_{s=s_N} = \vec{d}_2, \quad (22)$$

С помощью метода квазилинеаризации краевая задача (21), (22) сводится к последовательности линейных краевых задач, которую сокращенно можно записать в виде

$$\frac{d\vec{N}^{k+1}}{ds} = \vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k), \quad (23)$$

$$B_1(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_0) = \vec{b}_1(\vec{N}^k), B_2(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_N) = \vec{b}_2(\vec{N}^k), \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (24)$$

где $\vec{N} = \{u, w, \theta_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\zeta\}^T$; \vec{N}^{k+1} и \vec{N}^k – решения соответственно на $k+1$ -й и k -й итерациях; $\vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k)$ – вектор правой части системы уравнений; $\vec{B}_1(\vec{N}^k), \vec{B}_2(\vec{N}^k), \vec{b}_1(\vec{N}^k), \vec{b}_2(\vec{N}^k)$ – соответственно матрицы и правые части граничных условий. На последнем этапе каждая из линейных краевых задач (23), (24) решается методом дискретной ортогонализации, обеспечивающим устойчивый вычислительный процесс благодаря процедуре ортогонализации векторов-решений задач Коши в отдельных точках интегрирования. Дано описание алгоритма и программы решения нелинейных краевых задач магнитоупругости гибких токонесущих ортотропных оболочек вращения.

Разработанный алгоритм решения нового класса задач магнитоупругости токонесущих ортотропных оболочек вращения обладающих ортотропной электропроводностью, магнитной и диэлектрической проницаемостью позволяет получать решения в широком диапазоне изменения геометрических параметров оболочки, механических характеристик материала, поверхностных и контурных нагрузок, вида закрепления граничных контуров, параметров электромагнитного поля. Алгоритм строится таким образом, чтобы, с одной стороны, он обладал достаточной общностью в смысле физической формулировки, с другой стороны, обладал универсальностью при решении задач для различных типов оболочек. Он также обладает тем свойством, что его структуру можно использовать в случае выбора другой теории оболочек. Также допускается использование различных интерполяционных формул при вычислении правой части системы уравнений. Разработанный алгоритм реализован в виде программы на языке визуал фортран для ПЭВМ. Программа имеет модульную структуру. Большая часть модулей, реализующих определенные части вычислительного процесса являются стандартными. Проведен анализ достоверности полученных,

результатов состоящий в оценке сходимости процесса решения задачи по приближениям, а также сопоставлением решений задач в другой математической постановке. На основе разработанной методики произведен расчет напряженно-деформированного состояния изотропной токонесящей кольцевой пластины и конической оболочки, находящиеся под воздействием механической силы, стороннего электрического тока и внешнего магнитного поля. Как следует из результатов сравнений, с увеличением продолжительности действия сил и уменьшением шага по времени, различие между значениями прогибов и напряжений при различных шагах незначительно увеличивается. Полученные численные данные на четвертом и пятом приближениях практически совпадают, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости итерационного процесса. Результаты сравнений в изотропной постановке с полученными данными других авторов показывают о возможности применения предложенного подхода для исследования напряженно-деформированного состояния гибких токонесящих ортотропных оболочек вращения, обладающих ортотропной электропроводностью.

В пятой главе диссертации рассмотрены задачи магнитоупругости для токонесящих ортотропных конических оболочек вращения с учетом ортотропной электропроводности в нелинейной постановке, находящихся в нестационарном магнитном поле. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния гибкой ортотропной конической оболочки из бороалюминия постоянной толщины $h = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, находящейся под действием механической нагрузки $P_\zeta = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ Н/м}^2$. Оболочка находится во внешнем магнитном поле $B_{s_0} = 0.1 \text{ Тл}$ и к ней подводится сторонний электрический ток плотности $J_{\theta_{CT}} = -5 \cdot 10^4 \sin \omega t \text{ А/м}^2$, а также оболочка имеет конечную ортотропную электропроводность $\sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. Отметим, что в рассматриваемом случае анизотропия удельного электрического сопротивления равна $\eta_3 / \eta_1 = 2.27$.

Рассмотрен учет влияния конусности на нелинейное поведение ортотропной оболочки. Задача решалась при граничных условиях: контур малого радиуса $s = s_0$ загружен перерезывающим усилием Q_s и свободен в нормальном направлении и задается переменная по времени магнитная индукция $B_\zeta = 0.3 \sin \omega t$, где ω – круговая частота; второй контур $s = s_N$ жестко закреплен при магнитной индукции равной нулю $B_\zeta = 0$. Выявлено, что взаимодействие магнитной индукции и перерезывающей силы вызывает появление экстремальных значений прогиба и механических напряжений, напряженности электрического поля и магнитной индукции. Отметим, что магнитная индукция и перерезывающая сила задаются на левом контуре оболочки (граничные условия) и при этом перерезывающее усилие Q_s и нормальная составляющая магнитной индукции B_ζ противоположно направлены. Установлено, что с уменьшением угла конусности абсолютные величины прогиба и механических напряжений, напряженности электрического поля и

магнитной индукции возрастают. При $\varphi = \pi/30$ максимальные значения этих функций существенно возрастают, по сравнению с максимальными величинами для остальных углов и сдвигаются к s_0 . Этот факт иллюстрирует взаимосвязь электромагнитных и механических полей. Выявлено, что угол раствора конуса равный шести градусам оказался критическим для рассматриваемой геометрически нелинейной оболочки при подобранных нагрузках. Дальнейшее уменьшение угла ($\varphi = \pi/30$) приводит к потере устойчивости оболочки. Исходя из полученных результатов, можем судить о влиянии угла конусности на напряженно-деформированное состояние ортотропной оболочки, учитывая, что угол φ дополняет угол при основании конуса до 90° . Отметим, что колебательные процессы, происходящие в оболочке обладающей ортотропной электропроводностью находящейся в магнитном поле, соответствуют в своей чисто механической части колебательным процессам оболочки, находящейся под воздействием только механической нагрузки. Это является еще одним подтверждением правильности выбора методики и корректностью полученных уравнений.

Исследовано влияние учета нелинейности на поведение токнесущей ортотропной оболочки в магнитном поле. Для анализа учета влияния нелинейности на напряженно-деформированное состояние ортотропной конической оболочки проведено сравнение решений, полученных в линейной и нелинейной постановках. Задача решалась при граничных условиях: контур малого радиуса $s = s_0$ загружен перерезывающим усилием Q_s и свободен в нормальном направлении и задается переменная по времени магнитная индукция $B_z = 0.3 \sin \omega t$, где ω – круговая частота; второй контур $s = s_N$ жестко закреплен при магнитной индукции равной нулю $B_z = 0$. Значение B_{z_0} , удовлетворяющее задаче магнитостатики, выбиралось как среднее значение из решения нелинейной задачи и принималось равным $B_{z_0} = -0,79 \cdot 10^{-3} \text{Тл}$.

Сравнены значения прогиба w , окружного механического напряжения σ_θ^+ на внешней поверхности оболочки, нормальной составляющей индукции магнитного поля B_z и меридиональной составляющей силы Лоренца F_s^\wedge в зависимости от s для углов $\varphi = \pi/30, \pi/15$ в линейной и нелинейной постановках. Значения функций взяты при $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{с}$, где они достигают максимальных значений. Рассматривая значения функций для угла $\varphi = \pi/30$, отмечаем, что различие максимальных значений прогиба w по двум теориям (контур $s = s_0$), составляет 27%; для σ_θ^+ при $s = 0,08 \text{м}$ достигает 97%; B_z при $s = 0,04 \text{м}$ достигают 41%; F_s^\wedge при $s = s_0$ практически равны, различие составляет 0,3%. Рассматривая угол $\varphi = \pi/15$, отмечаем совпадение результатов, как по линейной, так и по нелинейной теориям при их максимальных значениях. Установлено, что различие между решениями в линейной и нелинейной теориях возрастают с уменьшением угла φ (увеличением угла раствора конуса). В тоже время необходимо отметить существенное различие по линейной и нелинейной теориям для напряжения, магнитной индукции и

силы Лоренца при подходе к правому торцу оболочки ($s = 0.28; 0.32; 0.36 м$). Анализируя полученные результаты, можем судить о влиянии геометрической нелинейности на напряженно-деформированное состояние ортотропных оболочек в сравнении с линейной теорией.

На основе сравнения результатов решений, полученных для токонесущего ортотропного конуса из бериллия и токонесущего изотропного конуса из алюминия, а также для изотропного конуса из алюминия при отсутствии магнитного поля и стороннего тока исследованы напряженно-деформированные состояния гибких оболочек в нелинейной постановке. Во всех трех случаях распределение прогиба нелинейное и их максимальные значения возникают в левом контуре оболочки. При этом, в случае ортотропного конуса из бериллия и изотропного конуса из алюминия, с учетом магнитного поля максимальные значения прогиба отличаются примерно в два раза. Выявлено, что в случае изотропного конуса, без воздействия магнитного и электрического полей, прогиб существенно возрастает ($w/h_0 = 4$). Это объясняется тем, что при отсутствии электрического поля, действующего на оболочку, растягивающие силы тангенциальной составляющей магнитной индукции (B_s^\pm) и тангенциальной составляющей силы Лоренца (ρF_s^\wedge) равны нулю. В этом случае оболочка становится более податливой, т.е. гибкой относительно прогиба. Отсутствие магнитного поля ($B_z = 0$) также приводит к увеличению прогиба. В зависимости от изменения толщины оболочки исследовано поведение ортотропной оболочки. Условия закрепления контуров оболочки выбраны следующие: контур малого радиуса $s = s_0$ шарнирно закреплен и задается переменная по времени магнитная индукция B_z , а второй контур $s = s_N$ свободен в меридиональном направлении при магнитной индукции равной нулю. Задача для ортотропного конуса из бериллия переменной толщины $h = 5 \cdot 10^{-4} (1 - \alpha \frac{s}{s_N})$ рассчитана при различных значениях параметра $\alpha = \{0.2; 0.3; 0.4; 0.5\}$ характеризующего переменность толщины в меридиональном направлении. Установлено, что увеличение значения параметра α приводит к увеличению прогиба, окружных напряжений $\sigma_{22}^\pm(s)$ оболочки, напряжений максвелла $T_{22}^+(s)$ и др. Как видно из полученных результатов, переменность толщины оказывает значительное влияние на напряженно-деформированное состояние оболочки, что необходимо учитывать при практических расчетах.

При различных видах закрепления контуров оболочки исследовано напряженно-деформированное состояние гибкого токонесущего ортотропного конуса из бериллия переменной толщины. Из полученных результатов видно, что краевые условия закрепления контуров оболочки существенно влияют на значения и распределения прогибов, перерезывающих сил и изгибающих моментов, сил Лоренца, магнитной индукции и напряженности электрического поля. Выявлено, что максимальные прогибы и изгибающие моменты, силы Лоренца, магнитная индукция и напряженность электрического поля возникают при «шарнирно-скользящем» граничных условиях.

Получены численные результаты при шарнирном закреплении контуров оболочки для случаев, когда на левом контуре задается магнитная индукция и напряженность электрического поля. Установлено, что при наличии на левом контуре оболочки магнитной индукции значения прогибов, изгибающих моментов, сил Лоренца, магнитной индукции и напряженности электрического поля намного больше по сравнению с наличием электрического поля. Исходя, из полученных результатов можно судить о влиянии граничных условий на взаимосвязанность механических и электромагнитных полей.

Проанализировано влияние внешней магнитной индукции на напряженное состояние ортотропной оболочки в геометрически нелинейной постановке. Усеченная ортотропная коническая оболочка из бериллия переменной толщины находится под воздействием механической силы $P_\zeta = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ H} / \text{m}^2$, стороннего электрического тока $J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^5 \sin \omega t \text{ A} / \text{m}^2$ и внешнего магнитного поля $B_{s_0} = 0.1 \text{ Тл}$, а также оболочка имеет конечную ортотропную электропроводность $\sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. В этом случае на оболочку действует комбинированное нагружение, состоящее из пондеромоторной силы Лоренца внешнего магнитного поля и механической силы. Задача решалась при граничных условиях: контур малого радиуса $s = s_0$ шарнирно закреплён и задается переменная по времени магнитная индукция B_ζ , а второй контур $s = s_N$ свободен в меридиональном направлении при магнитной индукции равной нулю. Исследовано поведение ортотропной оболочки в зависимости от изменения внешнего нормального составляющего магнитного индукции B_{ζ_0} . Показано, что с изменением внешней нормальной составляющей магнитной индукции, происходит существенное изменение напряженного состояния оболочки и ее электромагнитного поля. Выявлено, что с увеличением магнитной индукции прогиб оболочки увеличивается. Увеличение индукции внешнего магнитного поля приводит к увеличению величины механических напряжений оболочки. Исследовано изменение величины индукции внутреннего магнитного поля оболочки в зависимости от изменения внешнего магнитного поля и от ортотропной электропроводности. Установлено, что при увеличении индукции внешнего магнитного поля индукция внутреннего магнитного поля тоже увеличивается. Это соответствует реальным физическим процессам, происходящим в оболочке, и в свою очередь подтверждает достоверность полученных результатов.

В зависимости от изменения стороннего электрического тока проведено исследование напряженно-деформированного состояния ортотропной конической оболочки переменной толщины. Оболочка из бериллия находится под воздействием механической силы $P_\zeta = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ H} / \text{m}^2$, стороннего электрического тока $J_{\theta CT} = J_{\theta CT} \sin \omega t \text{ A} / \text{m}^2$ ($J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^5, 5 \cdot 10^7, -5 \cdot 10^7, -8 \cdot 10^5, -1 \cdot 10^8$) и внешнего магнитного поля $B_{s_0} = 0.1 \text{ Тл}$, а также оболочка имеет конечную ортотропную электропроводность $\sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. В рассматриваемом случае анизотропия удельного электрического сопротивления бериллия равна

$\eta_3 / \eta_1 = 4.07$. Задача решалась при граничных условиях: контур малого радиуса $s = s_0$ шарнирно закреплен и задается переменная по времени магнитная индукция B_z , а второй контур $s = s_N$ свободен в меридиональном направлении при магнитной индукции равной нулю.

Показано, что подбирая величину плотности и направленность стороннего тока с учетом ортотропной электропроводности можно оптимизировать напряженное состояние оболочки, находящейся под воздействием нестационарных электромагнитных и механических полей. Выявлено, что увеличение значения стороннего электрического тока приводит к увеличению значения прогибов и напряжений оболочки, тангенциальных и нормальных составляющих сил Лоренца. При изменении направления стороннего тока направления действий поперечных сил совпадают с направлением нормальной составляющей механической нагрузки, что приводит к качественному и количественному изменению прогиб и напряжений оболочки, а также параметров электромагнитного поля. Таким образом, выбирая направленность и величину плотности стороннего электрического тока можно добиться минимального значения прогиба и напряжений в оболочке. Анализируя приведенные результаты расчетов, отметим, что они не противоречат механическому и физическому представлениям о процессах, происходящих в оболочке, находящейся под электромагнитным и механическим воздействием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сформулирована математическая постановка связанной динамической задачи магнитоупругости токонесущих оболочек с учетом анизотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости.

2. Построена нелинейная двумерная модель магнитоупругости токонесущих ортотропных оболочек в геометрически нелинейной постановке с учетом ортотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости. При этом принято, что главные направления ортотропии свойств материала оболочки совпадают с направлениями соответствующих координатных осей, а также ортотропное тело линейно относительно магнитных и электрических свойств.

3. На основе квадратичного варианта геометрически нелинейной теории оболочек и пластин, получена связанная разрешающая система нелинейных дифференциальных уравнений магнитоупругости, описывающая напряженно-деформированное состояние гибких токонесущих ортотропных оболочек вращения произвольного меридиана находящихся под воздействием нестационарных механических и электромагнитных нагрузок с учетом ортотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости.

4. Разработана методика и алгоритм численного решения новых классов связанных динамических задач магнитоупругости, позволяющие исследовать напряженно-деформированное состояние токонесущих ортотропных оболочек вращения с учетом ортотропной электропроводности, магнитной и

диэлектрической проницаемости в геометрически нелинейной постановке. На основе разработанной методики произведен расчет напряженно-деформированного состояния изотропной токонесущей кольцевой пластины и конической оболочки, находящиеся под воздействием механической силы, стороннего электрического тока и внешнего магнитного поля. Как следует из результатов сравнений, с увеличением продолжительности действия сил и уменьшением шага по времени, различие между значениями прогибов и напряжений при различных шагах незначительно увеличивается.

Полученные численные данные на четвертом и пятом приближениях практически совпадают, что свидетельствует об удовлетворительной сходимости итерационного процесса. Результаты сравнений в изотропной постановке с полученными данными других авторов показывают о возможности применения предложенного подхода для исследования напряженно-деформированного состояния гибких токонесущих ортотропных оболочек вращения, обладающих ортотропной электропроводностью.

5. Рассмотрен учет влияния конусности на нелинейное поведение ортотропной оболочки. Выявлено, что взаимодействие магнитной индукции и перерезывающей силы вызывает появление экстремальных значений прогиба и механических напряжений, напряженности электрического поля и магнитной индукции. Магнитная индукция и перерезывающая сила задаются на левом контуре оболочки (граничные условия) и при этом перерезывающее усилие и нормальная составляющая магнитной индукции противоположно направлены.

Установлено, что с уменьшением угла конусности абсолютные величины прогиба и механических напряжений, напряженности электрического поля и магнитной индукции возрастают. Этот факт иллюстрирует взаимосвязь электромагнитных и механических полей. Выявлено, что угол раствора конуса равный шести градусам оказался критическим для рассматриваемой геометрически нелинейной оболочки при подобранных нагрузках. Дальнейшее уменьшение угла конусности приводит к потере устойчивости оболочки.

6. На основе сравнения результатов решений, полученных для токонесущего ортотропного конуса из бериллия и токонесущего изотропного конуса из алюминия, а также для изотропного конуса из алюминия при отсутствии магнитного поля и стороннего тока проанализированы напряженно-деформированные состояния гибких оболочек в нелинейной постановке. Во всех трех случаях распределение прогиба нелинейное и их максимальные значения возникают в левом контуре оболочки. При этом, в случае ортотропного конуса из бериллия и изотропного конуса из алюминия, с учетом магнитного поля максимальные значения прогиба отличаются примерно в два раза. Выявлено, что в случае изотропного конуса, без воздействия магнитного и электрического полей, прогиб существенно возрастает. Это объясняется тем, что при отсутствии электрического поля, действующего на оболочку, растягивающие силы тангенциальной составляющей магнитной индукции и тангенциальной составляющей силы Лоренца

равны нулю.

Сравнены результаты решений, полученные в линейной и нелинейной постановках. Установлено, что различие между результатами решений в линейной и нелинейной постановках возрастают с уменьшением угла конусности. Анализируя полученные результаты, можно судить о влиянии геометрической нелинейности на напряженно-деформированное состояние ортотропных оболочек в сравнении с линейной теорией.

7. Получены численные результаты для ортотропного конуса из бериллия переменной толщины при различных значениях параметра " α ", характеризующего переменность толщины в меридиональном направлении. Установлено, что увеличение значения параметра " α " приводит к увеличению прогиба, окружных напряжений оболочки, напряжений максвелла и др. Как видно из полученных результатов, переменность толщины оказывает значительное влияние на напряженно-деформированное состояние оболочки, что необходимо учитывать при практических расчетах.

Получены численные результаты при различных видах закрепления контуров оболочки. Из полученных результатов видно, что краевые условия закрепления контуров оболочки существенно влияют на значения и распределения прогибов, перерезывающих сил и изгибающих моментов, сил Лоренца, магнитной индукции и напряженности электрического поля. Выявлено, что максимальные прогибы и изгибающие моменты, силы Лоренца, магнитная индукция и напряженность электрического поля возникают при «шарнирно-скользящем» граничных условиях. Установлено, что при наличии на левом контуре оболочки магнитной индукции значения прогибов, изгибающих моментов, сил Лоренца, магнитной индукции и напряженности электрического поля намного больше по сравнению с наличием электрического поля. Исходя, из полученных результатов можно судить о влиянии граничных условий на взаимосвязанность механических и электромагнитных полей.

8. Выявлено, что с увеличением магнитной индукции прогиб и напряжений оболочки увеличивается. Установлено, что при увеличении индукции внешнего магнитного поля индукция внутреннего магнитного поля тоже увеличивается. Это соответствует реальным физическим процессам, происходящим в оболочке, и в свою очередь подтверждает достоверность полученных результатов.

Показано, что подбирая величину плотности и направленность стороннего тока с учетом ортотропной электропроводности можно оптимизировать напряженное состояние оболочки, находящейся под воздействием нестационарных электромагнитных и механических полей.

Выявлено, что увеличение значения стороннего электрического тока приводит к увеличению значения прогибов и напряжений оболочки, тангенциальных и нормальных составляющих сил Лоренца.

Таким образом, выбирая направленность и величину плотности стороннего электрического тока можно добиться минимального значения прогиба и напряжений в оболочке.

9. В рассмотренных задачах построены зависимости значений характерных функций напряженно-деформированного состояния от электромагнитных параметров, в частности от ортотропной электропроводности и от ортотропии свойств материала, позволяющие оценить влияние взаимосвязанности полей. Использование полученной системы связанных уравнений магнитоупругости ортотропных оболочек вращения, разработанных методик решения нестационарных задач теории токнесущих оболочек с учетом ортотропной электропроводности в геометрически нелинейной постановке дает возможность решать новый класс задач. При этом более полно учитывается влияние ортотропной электропроводности, магнитной и диэлектрической проницаемости материала и реальные условия работы элементов конструкций, что позволяет делать выбор рациональных геометрических, механических и электромагнитных параметров для повышения надежности работы конструкции.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREE OF
DOCTOR OF SCIENCES 16.07.2013. T/FM.02.02 AT TASHKENT STATE
TECHNICAL UNIVERSITY AND NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

**MINISTRY OF HIGHER AND SECONDARY SPECIALIZED
EDUCATION OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

INDIAMINOV RAVSHAN SHUKUROVICH

**DEVELOPMENT OF THE THEORY OF MAGNETOELASTICITY
CURRENT-CARRING SHELLS OF ROTATION WITH RESPECT
TO ORTHOTROPIC ELECTROCONDUCTIVITY**

**01.02.04 – Deformable solids mechanics
(physical and mathematical sciences)**

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2014

The subject of doctoral dissertation is registered the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan in number 20.02.2014/B2013.1.FM1.

Doctoral dissertation is carried out at Institute of Mechanics and seismic stability of structures of the Academy of sciences of the Republic of Uzbekistan and Samarkand Branch of Tashkent University of Information Technology.

The full text of doctoral dissertation is placed on web page of Scientific council 16.07.2013. T/FM.02.02 at the Tashkent state technical university and National University of Uzbekistan to the address www.tdtu.uz/tadqiqitchi/dis_matn.htm.

Abstract of dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English) is placed on web page to address [www.tdtu.uz/ tadqiqitchi/avr_matn.htm](http://www.tdtu.uz/tadqiqitchi/avr_matn.htm) and Information-educational portal "ZIYONET" to address www.ziyonet.uz

**Scientific
consultants:**

Shirinkulov Tashpulat Shirinkulovich

doctor of technical sciences, academician

Mol'chenko Leonid Vasil'evich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Official
opponents:**

Mardonov Botirjan Mardonovich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Safarov Ismoil Ibragimovich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Karnaikhov Vasilij Gavrilovich

doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Leading
organization:**

Tashkent institute of railway engineering

Defense will take place «___» _____ 2014 at _____ at the meeting of scientific council number 16.07.2013. T/FM.02.02 at the Tashkent State Technical University and National University of Uzbekistan to adress: 100095, Uzbekistan, Tashkent, Universitetskaya str., 2. Phome / fax: (99871) 227-10-32, e-mail: tadqiqitchi@tdtu.uz).

Doctoral dissertation is registered in Information-resource centre at Tashkent state technical university № 01, it is possible to review it in IRC (100095, Uzbekistan, Tashkent city, Almazarskiy district, Universitetskaya str., 2. Phome: (99871) 246-46-00).

Abstract of dissertation sent out on «___» _____ 2014 year

(mailing report № _____ on _____ 2014 year)

K.A. Karimov

Chairman of scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences D.T.S., professor

N.J. Turahodjaev

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degree of PhD of technical sciences

M. M. Mirsaidov

Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences, D.T.S., professor

ANNOTATION OF DOCTORAL DISSERTATION

Topicality and demand of the subject of dissertation. Increased interest in the problems of mechanics of coupled fields, primarily to electromagnetoelasticity, caused by the needs of today's technological advances in various industries and the development of innovation technologies. The issues of motion of a continuum with electromagnetic effects fill a highly important place in the mechanics of coupled fields.

One of the main directions of development of modern solid mechanics is a development of the theory of conjugate fields and, in particular, the theory of the electromagnetic interaction with deformable medium.

The mechanism of interaction of an elastic medium with the electromagnetic field is diverse and depends on the geometrical characteristics and physical properties of the body under consideration.

In particular, this mechanism gets some specifics when considering the problems of thin plates and shells having anisotropic conductivity.

In creating optimal structures in modern engineering, widespread use is made of thin-walled shells and plates as structural elements in which effects of nonlinear electromagnetic interaction with magnetic fields are significant.

Effects of the coupling of mechanical displacements of conductive bodies with the electromagnetic field are conditioned by the Lorentz ponderomotive forces. The Lorentz forces depend on the speed of the conductive elements of a continuous medium and the external magnetic field, the magnitude and orientation of the conduction current in reference to external magnetic field. Significant effects of ponderomotive interactions occur for high-frequency oscillations at large amplitudes of displacements, pulsed magnetic fields and current-carrying elements. It is for these conditions are first necessary to develop mathematical foundations of magnetoelasticity and applied methods for solving certain classes of problems. Among these classes of problems, first of all, we note the problem for current-carrying thin anisotropic plates and shells placed in a strong external magnetic field, as well as the problem of nonlinear magnetoelastic vibrations of thin-walled elements in a magnetic field.

On the basis that specific magnetoelastic effects found in the study of nonlinear coupled problems, it seems urgent development of numerical approaches to solving problems related to the magneto-anisotropic flexible current-carrying plates and shells having anisotropic conductivity under the influence of non-stationary electromagnetic and mechanical stresses. In studies of nonlinear magnetoelasticity problems of special interest is determination of the stress-strain state of current-carrying plates and shells on exposure to variable electromagnetic and mechanical fields with regard to anisotropic electroconductivity, magnetic and dielectric permittivity.

Demand of these problems and interest in ones is conditioned by wide application in modern engineering as constructive elements of thin shells and plates, which are exposed to strong magnetic fields. These problems occur in modern technology, where such structures are used as protecting or bearing

elements for shielding external fields of strong magnetic equipment. This interest is conditioned by the need to solve problems of electromagnetic compatibility with the development of modern measuring systems, computer devices, measurements of weak pulsed fields on the background of large fields, the development of the protection of personnel from electromagnetic effects, etc.

Topicality and demand of the subject of dissertation in the formulation and solution of problems in accordance with the Law of the Republic of Uzbekistan "On providing an electromagnetic compatibility" (1999, № 1, art.16, 2003, № 5, art. 67, 2013, № 18, art. 233).

The electromagnetoelasticity coupled problems of anisotropic plates and shells having anisotropic conductivity are of scientific interest in terms of both theory and applications. The matter is that in the case of thin anisotropic bodies having anisotropic conductivity it is possible to solve optimal problems of magnetoelasticity by the variation of all physical-mechanical material parameters of body.

In particular, when mechanical and geometric parameters of the problem are constant, using variation of anisotropic electrodynamic parameters it is possible to obtain constructive elements with qualitatively new mechanical behavior. It should be noted, that recently the materials with new electromagnetic properties were created. These materials can be used in different areas of new appliances at creation of new technologies.

Conformity of research to priority directions of development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan. The present work is carried out according to priority directions of development of science and technology of the Republic of Uzbekistan № F4 "Mathematics, Mechanics and Computer Science."

International review of scientific researches on the dissertation subject.

The scientific research are focusing on the problems of nonlinear theory of magnetoelasticity of plates and shells is carried out in research centers and higher educational institutions of the USA, Germany, Great Britain, France and Japan, Ukraine, Armenia, Russia etc.

The latest development of modern technology, operation of which occurs in difficult loading conditions under the interaction of various physical factors, stimulated the creation and development of the theory of conjugate fields in elastic bodies. It is also of fundamental importance for magneto elasticity (motion of elastic conductive bodies in a magnetic field). At the present time the solid mechanics issues received considerable attention for the study of the interaction between mechanical deformation fields with electromagnetic fields.

Degree of study of problem. Despite the large number of studies, the development of the complex problem of the interaction of thin-walled elements such as shells and plates with the electromagnetic field is far from complete, and further research in this area will certainly help discover new effects. In most studies the interaction of an elastic body with the electromagnetic field is considered in the linear formulation, excluding the anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric constant.

When the material of the conductive elastic body has the property of anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permeability, the nature of the interaction fields is much more complicated. Therefore the creation of nonlinear theory of magnetoelastic interaction with regard to anisotropic electroconductivity, magnetic and dielectric permittivities is of scientific interest, as from the point of view the theory as well as applications. It must be underscored that the solutions of nonlinear magnetoelasticity coupled problems of current-carrying shells, having anisotropic conductivity, magnetic and dielectric permittivity are practically absent in the available literature. This is due to the complexity of the original system coupled magnetoelastic partial differential equations, a lack of approaches and algorithms for solving such problems, which determined the objective of this thesis.

Connection of dissertational research with the plans of scientific-research works is reflected in following projects:

State fundamental programs: topic FA-F8-F089 – Development of theoretical bases for design of stress-strain state of plate-like and shell structures and interacting medium within the limits of three-dimensional dynamic theory of elasticity (2007-2011); F4-FC-0-11951-F4-024- «Development of methods and algorithms, programs for the numerical solution nonlinear electromagnetoelasticity current-carrying anisotropic bodies having anisotropic electroconductivity » (2012-2016) and the work was performed under the support of the Fund for fundamental investigations of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan on scientific project No 48-08 – Development of the methods of investigation of stress-strain state of anisotropic plates and shells, interacting with elastic foundation (2008-2009).

Purpose of research is the development of the theory of nonlinear magnetoelasticity current-carrying anisotropic bodies having anisotropic electroconductivity, mathematical modeling and the decisions of the new class of magnetoelasticity, which will explore the stress-strain state and analyze the electromagnetic effects in orthotropic shells of revolution with the ultimate orthotropic conductivity, magnetic and dielectric permittivities.

To achieve this goal the following **tasks of research** are solved:

to formulate the physical principles and mathematical models of the magnetoelastic deformation anisotropic current-carrying bodies with anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivities;

the advancement of mathematical foundations and applications of the theory of deformation of flexible current-carrying shells having anisotropic conductivity under the influence of non-stationary electromagnetic fields and mechanical stresses;

the development of methods for the approximate solution of nonlinear boundary value problems of magnetoelasticity for current-carrying shells of revolution having orthotropic conductivity, rigidity which is varied in two coordinate directions, and are subjected to the unsteady electromagnetic and mechanical forces;

the derivation of the coupled governing systems of nonlinear differential equations of magnetoelasticity of current-carrying flexible orthotropic shells of revolution having orthotropic conductivity under the nonstationary effects;

the development of an effective approach to the numerical solution of the coupled dynamic problems of magnetoelasticity of orthotropic shells of revolution in nonlinear formulation;

the analysis of electromagnetic effects and stress-strain state of the aforementioned bodies in a wide range of geometrical, mechanical and electromagnetic parameters.

Object of research is the behavior of the current-carrying magnetoelastic isotropic and anisotropic bodies with anisotropic electrical conductivity, permittivity and magnetic.

Subject of research - the development of mathematical models and methods for solving the magnetoelasticity problems to explore the relationship of mechanical and electromagnetic fields in conductive bodies having anisotropic conductivity, magnetic and dielectric permittivity.

Methods of research. The methods of linearization and steady numerical method of discrete orthogonalization were used in the study.

Scientific novelty of dissertational research consists in the following:

there was first formulated the geometric nonlinear statement of the conjugate dynamic problem of magnetoelasticity to the current-carrying shells taking into account the anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity;

the nonlinear two-dimensional magnetoelastic model for the current-carrying orthotropic shells with finite orthotropic conductivity, magnetic and dielectric permittivity was first obtained;

resolving system of equations which describes nonsymmetrical deformation of flexible conductive shells of rotation, which have orthotropic electroconductivity variable in two coordinate directions of hardness impacted by the nonstationary electromagnetic as well as mechanical forces was obtained;

coupled resolving nonlinear differential equations system of magnetoelasticity of flexible current-carrying orthotropic shells of rotation of arbitrary meridian due to orthotropic electroconductivity, magnetic and dielectric permeability, under the nonstationar impact was obtained;

the methods and algorithms for solution of coupled dynamic problems for magnetoelsticity of orthotropic shells of rotation subject to finite orthotropic conductivity, magnetic permeability and dielectric permittivity in nonlinear statement are for the first time developed;

new effects caused by connection of mechanical deformation fields with electromagnetic fields due to final orthotropic electroconductivity, magnetic and electrical permeability were discovered;

the stress-strain state of a current-carrying orthotropic shell with orthotropic conductivity was optimized for the selected direction and magnitude of a foreign current density.

Practical results of research consist in the following:

new effects of interaction between conductive elastic bodies with electromagnetic fields were discovered. Taking into account these effects could be useful in the solving of a lot of practical problems in different fields of new technology;

on the base of the obtained equations and using the method proposed in the dissertation one can consider anisotropy of the material as well as anisotropy of inner electromagnetic field of the shell, that is practical value of the carried-out work;

in the reviewed problems dependences of the stress-strain state functions values from electromagnetic parameters, particularly from orthotropic electroconductivity and orthotropic properties of material were built. These dependences allows one to evaluate influence of the field interconnection.

Reliability of obtained results proved by a correctness of the boundary problems setting, rigor of mathematical calculations, using of well-grounded methods of solving and evaluation of the accuracy of the results, comparison with the problem solving in the different mathematical setting.

Theoretical and practical value of results of research. Theoretical values obtained in the work make an important contribution in the nonlinear magnetoelasticity theory, thin shells theory development.

Practical significance of the work is that the method and algorithm for calculation and optimization stress-strain state, flexible current-carrying orthotropic shells of rotation having electroconductivity in the wide range of its parameters change at different conditions of the edge fixing, which impacted by nonstationary mechanical and electromagnetical fields were developed. Interaction of magnetic induction and cutting force induces appearance of extreme values. Cone's opening angle equals to six degrees appears to be critical for the geometrically nonlinear theory with selected loadings. Further decreasing leads to the loss of the shell stability. It was found that a decrease in the cone angle leads to absolute values of deflection and stresses, electric field and magnetic flux density increase. This fact illustrates the interconnection of electromagnetic and mechanical fields. The problem of external electric current influence on stress-strain state of orthotropic shell at known values of external magnetic field parameters and surface mechanical stress was studied. It was shown that picking of density value and external current direction due to orthotropic electroconductivity, optimization of stress state of the shell which is under impact of nonstationar electromagnetic and mechanical fields could be done.

Realization of results of researches. Obtained theoretical results used in the development of the nonlinear theory deformations of anisotropic shells and plates under the influence of nonstationary mechanical and electromagnetic fields in the framework of research projects: FA-F8-F089 "Development of theoretical bases for design of stress-strain state of plate-like and shell structures and interacting medium within the limits of three-dimensional dynamic theory of elasticity" is carried out at the Institute of Mechanics and seismic stability of structures of the Academy of sciences of the Republic of Uzbekistan (Conclusion Committee for coordination science and technology development under Cabinet of

Ministers of Uzbekistan from 26.06.2007); № 48-08 “Development of the methods of investigation of stress-strain state of anisotropic plates and shells, interacting with elastic foundation” is carried out at the Institute of Mechanics and seismic stability of structures of the Academy of sciences of the Republic of Uzbekistan (Council decisions Funds for fundamental investigations of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan from 18.01.2008).

Approbation of work. Results of the research were reported at 25 scientific conferences, including 20 international conferences: The 5th Interational Conference on «European Science and Technology» (Munich, 2013); XI International scientific and practical conference "Basic and Applied Researches, Development and Application of High Technologies in the Industry" (St. Petersburg, 2011); Abstracts of reports of The XII and XI All Ukrainian scientific-methodological conferences "Modern problems of natural sciences and a problem of training of specialists in these fields" (Nikolaev, 2007, 2009); International scientific and technical conference "Computing Mechanics of a Deformable Solid Body" (Moscow, 2006) and others.

The main results of the thesis discussed at scientific seminars: department of continuum mechanics, Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, 2006-2009); department of thermoelasticity at Institute of Mechanics named by S.P. Tymoshenko of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, 2009); laboratory of “Space systems dynamics” Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Tashkent, 2005-2011); united city scientific seminar «Mechanics of deformable solid» at Samarkand State Architect Institute named by M.Uglugbek (Samarkand, 2008); department of theoretical and applied mechanics, National University of Uzbekistan (Tashkent, 2010); at the joint scientific seminars at "Information Technologies", "Computer Systems", "Natural Sciences" department of the Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies (Samarkand, 2013); at a scientific seminar on the specialty 01.02.04 - "Deformable solids mechanics" with Scientific council 16.07.2013.T/FM.02.02. Tashkent State Technical University named by Abu Raihan Beruni and National University of Uzbekistan (Tashkent, 2014).

Publication of results. 51 scientific works were published on the topic of the dissertation. 12 scientific articles of these were published in international journals.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consist of Introduction, five chapters, conclusion, list of publications consisting of 253 names, 9 applications and contain 200 pages of typescript, including 110 pictures and 5 tables.

MAIN CONTENTS of DISSERTATION

In the introduction the urgency and demand of the theme of dissertation is proved, the purpose and problems, and also object and an object of research are formulated, conformity of research to priority directions of development of science and technologies in the Republic of Uzbekistan is stated, scientific novelty and practical results of research are stated, reliability of obtained results is proved, the

theoretical and practical importance of obtained results is revealed, the list of introductions in practice of research results, data on published works and dissertation structure are given.

In the first chapter of the dissertation an overview of international research on the topic of the thesis on the problems of the interaction of electromagnetic fields with a deformable medium. In this chapter the approaches to the problems of magnetoelasticity of the theory of plates and shells in geometrically nonlinear formulation are described.

The significant contribution to the development of certain areas of electromagnetoelasticity was made by S.A. Ambartsumyan, A.I. Akhiezer, G.E. Bagdosaryan, M.V. Belubekyan, Y.I. Burak, K.B. Vlasov, A.S. Volmir, B. P. Galapats, A.R. Gachkevich, B. M. Gnidets, V.T. Grinchenko, L.A. Ilyushin, B.I. Kolody, V.F. Kondrat, Y.I. Lopushansky, V.Z. Parton, L.D. Landau, E.M. Lifshits, Y.S. Podstrigach, L.I. Sedov, A.N. Guz, F.G. Makhort, I.T. Selezov, A.F. Ulitko, S.A. Kaloyerov, V. G. Karnaukhov, M.P. Korotkina, B.A. Kudryavtsev, V. Novatssky, D.I. Bardzokas, P.A. Mkrtchyan, K.V. Kazaryan, S.O. Sarkisyan, W.F. Brown, L. Knopoff, J.W. Dunkin, A.C. Eringen, Mc. Carthy, S. Chattopadhyay, S. Kaliski, P. Chadwick, J.C. Baumhaner, H.F. Tigrsten, A.E. Green, P.M. Naghdi, F.C. Moon, G.A. Maugin, R.A. Toupin, H. Parkus and others.

The works of Y.I. Burak and A.R. Gachkevich, L.V. Molchenko, V.I. Dresvyannikova, Y.I. Lopushansky, F.G. Makhortykh, A.F. Snail, O.N. Petrisheva, A.L. Radovinskogo, R.Sh. Indiaminova, K.Hiroyuki, N. Kikuo, I.Yoshio, T.Nobukazu, G.Nariboli, B.L. Juneja and others are focusing on the problems of nonlinear theory of magnetoelasticity of plates and shells. Application of numerical methods to solve problems in the theory of shells in geometrically nonlinear formulation studied by N.V. Valishvili, Y.M. Grigorenko and A.P. Mukoeda, Y.M. Grigorenko and N.N. Kryukov, A.V. Karmishina, V.A. Lyaskovtza, V.I. Myachenkova and A.N. Frolova, S.A. Kapustin and A. Latukhina, V.E. Shaman, M.S. Kornishina, V.A. Postnova and many others.

In most studies the interaction of an elastic body with the electromagnetic field is considered without taking into account the anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity. When the material of the conductive elastic body has the property of anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity, the picture of the field's interaction becomes much more complicated and therefore a simplified nonlinear theory of magnetoelastic interaction due to the anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity is of scientific interest both in terms of theory and applications.

Also one can see from the review that the solution of nonlinear problems in magnetoelasticity of current-carrying shells having anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity is practically absent. This is due to the complexity of the original coupled system of magnetoelasticity partial differential equations, the lack of approaches and algorithms for solving such problems. The above review allows us to determine and formulate the objective of this dissertation.

In the second chapter of the dissertation the initial physical and mathematical terms and ratios of nonlinear magnetoelasticity of current-carrying shells having anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity in the three-dimensional setting are formulated. The initial and boundary conditions necessary for unique solution are set. Nonlinear coupled problems of magnetoelasticity of current carrying anisotropic bodies having anisotropic electrical conductivity in the Eulerian and Lagrangian representations are discussed. The transitions in the equations of electrodynamics to Lagrangian variables are performed.

Let a body be in a magnetic field created both an electric current in the body and a source beyond it. Assume that the body is an electric conductor (a current-carrying body). The current from the external source is conveyed to its ends. In the unperturbed state, the foreign electric current is uniformly distributed over the body (current density is independent of the coordinates). The body has finite conductivity and cannot spontaneously polarize and magnetize.

Let us define quantities and write equations that describe the electromagnetic field. In an Eulerian coordinate system, the electromagnetic field of the body is characterized by electric-field intensity \vec{e} , magnetic-field intensity \vec{h} , electric-flux density \vec{d} , and magnetic-flux density \vec{b} . In Lagrangian coordinate system, the respective quantities are denoted $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}$ and \vec{B} . A vector \vec{x} is carried from the Eulerian coordinate system to $\vec{\xi}$ in the Lagrangian system by the relations:

$$\begin{aligned} \rho &= \Gamma \rho^*; \vec{E} = F^T \vec{e}; \vec{H} = F^T \vec{h}; \\ \vec{D} &= \Gamma F^{-1} \vec{d}; \vec{B} = \Gamma F^{-1} \vec{b}; \Gamma \rho = P F^T; \\ \vec{P}_R &= P \vec{n}_R; R_e = \Gamma \rho_e; \vec{J} = \Gamma F^{-1} \vec{j} \end{aligned} \quad (1)$$

where $\Gamma = \det \left| \frac{\vec{x}}{\vec{\xi}} \right|$, $F = \frac{\partial x_i}{\partial \xi_j}$ ($i, j = 1, 2, 3$).

In this case, the equations of magnetoelasticity for anisotropic bodies in Lagrangian coordinate in the region occupied by the body (the interior of the region) can be written as follows:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_{cm}; \text{div } \vec{B} = 0, \text{div } \vec{D} = 0; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho (\vec{f} + \vec{f}^\wedge) + \text{div } \vec{\alpha} \quad (3)$$

where \vec{J}_{cm} – a density of foreign current, \vec{f} – a volume force, \vec{f}^\wedge – a Lorentz volume force, \vec{J} – a density of current, $\vec{\alpha}$ – an internal stress tensor.

System of equations must be closed magnetoelasticity relations linking the vectors of the electromagnetic field and induction, as well as Ohm's law defining the conduction current density in a movable medium. If the body is linear with respect to the anisotropic magnetic and electrical properties, the constitutive equations for the electromagnetic field characteristics and kinematic equations for the electrical conductivity, as well as expressions for the Lorentz forces, taking into account the external current \vec{J}_{cm} into the Lagrangian variables are written respectively as:

$$\vec{B} = \mu_{ij} \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon_{ij} \vec{E}, \quad (4)$$

$$\vec{J} = \sigma_{ij} \Gamma F^T F^{-1} [\vec{J}_{cm} + \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}], \quad (5)$$

$$\rho \vec{f}^{\wedge} = \Gamma^{-1} F^{-1} [\vec{J}_{cm} \times \vec{B} + \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}]. \quad (6)$$

Here $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \mu_{ij}$ are the tensors of electrical conductivity, dielectric and magnetic permittivities of linear current-carrying anisotropic body ($i, j=1,2,3$) respectively. For homogeneous anisotropic media, they are symmetric second-rank tensors. Thus, equations (2) and (3) together with (4) - (6) are a closed system of nonlinear equations of magnetoelasticity for anisotropic current-carrying bodies with anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivities in the Lagrangian formulation.

The third chapter of the dissertation is devoted to the construction of geometrically nonlinear model of two-dimensional theory of current-carrying shells having orthotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity. Flexible current-carrying shells of variable thickness, finite conductivity, excluding the effects of polarization and magnetization and thermal stresses are considered. Elastic properties of the shell are considered orthotropic, which main directions of elasticity coincide with the directions of the corresponding coordinate lines. Material obeys the generalized Hooke's law and has a finite conductivity. Electromagnetic properties of the material of the current-carrying shell are characterized by tensors of electrical conductivity σ_{ij} , magnetic permeability μ_{ij} and dielectric permittivity ε_{ij} ($i, j=1,2,3$). At the same time due to the crystalphysics for the considered class of conducting media with rhombic crystal structure it was considered that the tensors $\sigma_{ij}, \mu_{ij}, \varepsilon_{ij}$ take a diagonal form. Coordinate surface of current-carrying orthotropic shell in the undeformed state we assign to curvilinear orthogonal coordinate system α, β, z , assuming that the coordinate lines of the middle surface of the shell coincide with the lines of main curvatures.

Using Kirchhoff-Love hypothesis, its adequate electromagnetic hypotheses and the principle of virtual displacements approximate two-dimensional system of coupled nonlinear equations of magnetoelasticity of current-carrying orthotropic shells with respect to orthotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity was obtained. Due to the problems specific solution of this system is necessary to look together with the equations of electrodynamics for vacuum, i.e. solve the external problem. This problem in nonlinear formulation is now almost unsolvable. In specific cases, the problem under consideration may allow various simplifications. Considering the known character of the distribution and variation in time of the magnetic field on the surface of orthotropic shell we can consider only the internal problem. As hypotheses of magnetoelasticity of anisotropic plates and shells we choose:

$$\begin{aligned} E_1 = E_1(\alpha, \beta, t); E_2 = E_2(\alpha, \beta, t); E_3 = \frac{\partial u_2}{\partial t} B_1 - \frac{\partial u_1}{\partial t} B_2; \\ J_1 = J_1(\alpha, \beta, t); J_2 = J_2(\alpha, \beta, t); J_3 = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$H_1 = \frac{1}{2}(H_1^+ + H_1^-) + \frac{z}{h}(H_1^+ - H_1^-); H_2 = \frac{1}{2}(H_2^+ + H_2^-) + \frac{z}{h}(H_2^+ - H_2^-); H_3 = H_3(\alpha, \beta, t).$$

Where u_i – the components of the shell points displacement vector; E_i, H_i – vector components of the electric and magnetic fields intensity of the shell; J_i – vortex current components; H_i^\pm – the tangential components of the magnetic field on the surface of the shell; h – the shell thickness. Further, using the boundary conditions on the surface of the shell derived hypotheses and solution of the initial static problem we define an approximate distribution of the external magnetic field on the surface of orthotropic shell:

$$B_\alpha^\pm = B_{\alpha o}^\pm + B_{\alpha o} - (B_{z o} - B_z)\theta_\alpha; B_\beta^\pm = B_{\beta o}^\pm + B_{\beta o} - (B_{z o} - B_z)\theta_\beta. \quad (8)$$

Here $B_{\alpha o}^\pm, B_{\beta o}^\pm$ – are the components of magnetic induction of primary intrinsic magnetic field caused by the external electric current; $B_{\alpha o}, B_{\beta o}, B_{z o}$ – components of the external magnetic field which were obtained by solving the problem of statics; B_z – normal component of the magnetic induction of the shell; θ_α and θ_β – are the angles of rotation of the normal.

Using the boundary conditions (8), further we obtain the ability to take into account the variation of the magnetic field on the surfaces of orthotropic shell having orthotropic conductivity during its deformation.

Current two-dimensional model of the magnetoelasticity of thin shells having orthotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity built in the quadratic approximation and also cubic nonlinearity is taken into account for the expressions for the Lorentz force. This is because in such problems at finite deformations nonlinear effects are defining and action of the electromagnetic field on the deformation field occurs mainly by these forces. Using the assumption of small deformation and rotation angles it was shown the equality of electromagnetic quantities in the Eulerian and Lagrangian representations.

The resulting two-dimensional system of equations is a system of coupled nonlinear differential equations of tenth-order hyperbolic- parabolic type with variable coefficients and referred to the undeformed surface. Based on obtained results, as initial relations describing the stress-strain state of the current-carrying orthotropic shells of the considered class, we take the following closed coupled system of equations:

The equations of motion

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} (BN_\alpha) - N_\beta \frac{\partial B}{\partial \alpha} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \beta} (A^2 S) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{AH}{R_\alpha} \right) + \frac{1}{R_\beta} \frac{\partial A}{\partial \beta} H + \frac{AB}{R_\alpha} Q_\alpha + \\ & + AB(p_\alpha + n_\alpha + \rho f_\alpha^\wedge) = AB\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ & \frac{\partial}{\partial \beta} (AN_\beta) - N_\alpha \frac{\partial A}{\partial \beta} + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \alpha} (B^2 S) + \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{BH}{R_\beta} \right) + \frac{1}{R_\alpha} \frac{\partial B}{\partial \alpha} H + \frac{AB}{R_\beta} Q_\beta + \\ & + AB(p_\beta + n_\beta + \rho f_\beta^\wedge) = AB\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha}(BQ_\alpha) + \frac{\partial}{\partial \beta}(AQ_\beta) - AB \left(\frac{N_\alpha}{R_\alpha} + \frac{N_\beta}{R_\beta} \right) + AB(p_z + n_z + \rho f_z^\wedge) = AB\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \quad (9)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial \beta}(A^2 H) + \frac{\partial}{\partial \alpha}(BM_\alpha) - \frac{\partial B}{\partial \alpha} M_\beta - ABQ_\alpha - AB \left(N_\alpha - \frac{1}{R_\beta} M_\beta \right) \theta_\alpha - ABS\theta_\beta = AB\rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \theta_\alpha}{\partial t^2};$$

$$\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \alpha}(B^2 H) + \frac{\partial}{\partial \beta}(AM_\beta) - \frac{\partial A}{\partial \beta} M_\alpha - ABQ_\beta - AB \left(N_\beta - \frac{1}{R_\alpha} M_\alpha \right) \theta_\beta - ABS\theta_\alpha = AB\rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \theta_\beta}{\partial t^2};$$

The equations of electrodynamics

$$\begin{aligned} -\frac{\partial B_z}{\partial t} &= \frac{1}{AB} \left(\frac{\partial(BE_\beta)}{\partial \alpha} - \frac{\partial(AE_\alpha)}{\partial \beta} \right); \\ \sigma_1 \left[E_\alpha + \frac{\partial v}{\partial t} B_z - 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\beta^+ + B_\beta^-) \right] &= \frac{1}{B} \left(\frac{\partial H_z}{\partial \beta} - \frac{B(H_\beta^+ - H_\beta^-)}{h} \right); \\ \sigma_2 \left[E_\beta - \frac{\partial u}{\partial t} B_z + 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) \right] &= \frac{1}{A} \left(-\frac{\partial H_z}{\partial \alpha} + \frac{A(H_\alpha^+ - H_\alpha^-)}{h} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

The connection between deformations and displacements

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\alpha\alpha} &= \frac{1}{A} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} v + \frac{w}{R_\alpha} + \frac{1}{2} \theta_\alpha^2; \quad \varepsilon_{\beta\beta} = \frac{1}{B} \frac{\partial v}{\partial \beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} u + \frac{w}{R_\beta} + \frac{1}{2} \theta_\beta^2; \\ \varepsilon_{\alpha\beta} &= \frac{A}{B} \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{u}{A} \right) + \frac{B}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{v}{B} \right) + \theta_\alpha \theta_\beta; \quad \chi_{\alpha\alpha} = \frac{1}{A} \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} \theta_\beta; \quad \chi_{\beta\beta} = \frac{1}{B} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial \beta} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} \theta_\alpha; \\ 2\chi_{\alpha\beta} &= \frac{1}{A} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial \alpha} + \frac{1}{B} \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial \beta} - \frac{1}{AB} \left(\frac{\partial A}{\partial \beta} \theta_\alpha + \frac{\partial B}{\partial \alpha} \theta_\beta \right) \\ &+ \frac{1}{R_\alpha} \left(\frac{1}{B} \frac{\partial u}{\partial \beta} - \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial \alpha} v \right) + \frac{1}{R_\beta} \left(\frac{1}{A} \frac{\partial v}{\partial \alpha} - \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial \beta} u \right); \end{aligned} \quad (11)$$

where $\theta_\alpha = -\frac{1}{A} \frac{\partial w}{\partial \alpha} + \frac{u}{R_\alpha}$; $\theta_\beta = -\frac{1}{B} \frac{\partial w}{\partial \beta} + \frac{v}{R_\beta}$.

Elasticity relations

$$\begin{aligned} N_\alpha &= \frac{e_\alpha h}{1 - \nu_\alpha \nu_\beta} (\varepsilon_{\alpha\alpha} + \nu_\beta \varepsilon_{\beta\beta}); \quad N_\beta = \frac{e_\beta h}{1 - \nu_\alpha \nu_\beta} (\varepsilon_{\beta\beta} + \nu_\alpha \varepsilon_{\alpha\alpha}); \quad S = g_{\alpha\beta} h \varepsilon_{\alpha\beta}; \\ H &= g_{\alpha\beta} \frac{h^3}{12} 2\chi_{\alpha\beta}; \quad M_\alpha = \frac{e_\alpha h^3}{12(1 - \nu_\alpha \nu_\beta)} (\chi_{\alpha\alpha} + \nu_\beta \chi_{\beta\beta}); \quad M_\beta = \frac{e_\beta h^3}{12(1 - \nu_\alpha \nu_\beta)} (\chi_{\beta\beta} + \nu_\alpha \chi_{\alpha\alpha}); \end{aligned} \quad (12)$$

here $\nu_\alpha = \nu_{\beta\alpha}$; $\nu_\beta = \nu_{\alpha\beta}$; $e_\alpha \nu_\beta = e_\beta \nu_\alpha$.

Here N_α, N_β – normal tangential forces in sections $\alpha = \text{const}$ and $\beta = \text{const}$; S – shear force; Q_α, Q_β – cutting forces, M_α, M_β – curving moment, H – twisting moment, u, v, w – the components of the displacement vector; $\varepsilon_{\alpha\alpha}, \varepsilon_{\beta\beta}, \varepsilon_{\alpha\beta}$ – tangential deformation of elongation and shear deformation; $\chi_{\alpha\alpha}, \chi_{\beta\beta}, \chi_{\alpha\beta}$ – bending and torsion; e_α, e_β – the elastic modules due to the directions α, β – correspondingly; R_α, R_β – the radiuses of curvature; A, B – Lamé coefficients; ν_α, ν_β – Poisson coefficients; $h = h(\alpha, \beta)$ – shell thickness; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – main components of the specific conductivity tensor.

The values of the projections of the ponderomotive force on the coordinate axes are presented as ρf_α^\wedge , ρf_β^\wedge , ρf_z^\wedge

$$\begin{aligned}
\rho f_\alpha^\wedge &= -h J_{\beta CT} B_z + \sigma_1 h \left\{ E_\beta B_z + 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) B_z - \frac{\partial u}{\partial t} B_z^2 + \right. \\
&+ \frac{\partial v}{\partial t} \left[0.25 (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) (B_\beta^+ + B_\beta^-) + \frac{1}{12} (B_\alpha^+ - B_\alpha^-) (B_\beta^+ - B_\beta^-) - (B_\beta^+ + B_\beta^-) B_z \right] + \\
&+ \left. \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial t} [(B_\beta^+ - B_\beta^-) B_z + (B_\alpha^+ B_\beta^+ - B_\alpha^- B_\beta^-)] \right\}; \\
\rho f_\beta^\wedge &= -h J_{\alpha CT} B_z + \sigma_2 h \left\{ -E_\beta B_z + 0.5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\beta^+ + B_\beta^-) - \right. \\
&- \frac{\partial v}{\partial t} \left[B_z^2 + 0.5 (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) B_z + 0.25 (B_\beta^+ + B_\beta^-)^2 B_z + \frac{1}{12} (B_\beta^+ - B_\beta^-)^2 \right] + \\
&+ \left. \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial t} [(B_\alpha^+ - B_\alpha^-) B_z - (B_\beta^+ - B_\beta^-)^2] \right\}; \\
\rho f_z^\wedge &= 0.5 h \left[-J_{\alpha CT} (B_\beta^+ + B_\beta^-) + J_{\beta CT} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) \right] \\
&+ \sigma_3 h \left\{ 0.5 E_\alpha (B_\beta^+ + B_\beta^-) - 0.5 E_\beta (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) - \right. \\
&- \frac{\partial w}{\partial t} \left[0.25 (B_\beta^+ + B_\beta^-)^2 + 0.25 (B_\alpha^+ + B_\alpha^-)^2 + \frac{1}{12} (B_\beta^+ - B_\beta^-)^2 + \frac{1}{12} (B_\alpha^+ - B_\alpha^-)^2 \right] + \\
&+ \left. 0.5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_\alpha^+ + B_\alpha^-) B_z + 0.5 \frac{\partial v}{\partial t} (B_\beta^+ + B_\beta^-) B_z + \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\alpha}{\partial t} (B_\alpha^+ - B_\alpha^-) B_z + \frac{h}{12} \frac{\partial \theta_\beta}{\partial t} (B_\beta^+ - B_\beta^-) B_z \right\}.
\end{aligned} \tag{13}$$

If it is known the distribution of the magnetic field on the surface of the shell than systems of equations (9)-(13) form a complete closed coupled system of nonlinear differential equations of magnetoelasticity of current-carrying orthotropic shell having orthotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity. Upon obtaining of the systems of equations it is assumed that the effect of the electromagnetic field and the external current on the deformation field occurs through the Lorentz forces. Closed system of magnetoelasticity equations obtained in the Lagrangian variables related to the undeformed middle surface of the orthotropic shell in an orthogonal curvilinear coordinate system.

In the fourth chapter of the dissertation the methodology for solving boundary value problems of nonlinear magnetoelasticity of the theory of current-carrying orthotropic shells of revolution having orthotropic conductivity under the nonstationar influence. The proposed approach to the numerical solution of nonlinear problems in magnetoelasticity of shell theory is based on the successive application of the finite-difference scheme of Newmark, the linearization method and discrete orthogonalization. Based on these relationships and related hypotheses resolution coupled system of nonlinear partial differential equations derived with variable coefficients describing the stress strain behavior of flexible current-carrying shell variable rotation in two coordinate directions stiffness.

Problems of the dynamics of flexible current-carrying shells of rotation having orthotropic conductivity, rigidity variable in two coordinate directions under the influence of nonstationar mechanical and electromagnetic forces, reduced to a two-dimensional nonlinear boundary value problem. Using the

complete system of equations in curvilinear orthogonal coordinate system which allows to mathematically describe the nonlinear two-dimensional model of the magnetoelasticity of orthotropic shells of rotation, associated resolving system of nonlinear differential equations magnetoelasticity of flexible current-carrying orthotropic shells of rotation of arbitrary meridian can be deduced with respect to orthotropic conductivity, magnetic and dielectric permittivity under nonstationary exposure. In constructing the allowing system of equations of orthotropic shell of rotation of variable thickness along the generator is taken into account that the elastic and magnetomechanical characteristics does not change along the parallel. It is assumed that all the required components of the electromagnetic field and the displacement field in the equations do not depend on the coordinate θ . In the case of study of the stress- strain state of orthotropic shells of rotation of arbitrary shape we will proceed from the following considerations. First, the required system of equations should describe the entire class of shells of revolution including a cylindrical shell and a circular plate, and secondly, it must be presented in a form suitable for numerical solution of the problem, thirdly, it must allow the formulation of the boundary conditions in the terms of forces, moments and movements and in a mixed form. Finally, the system of differential equations must be written with respect to those functions that the simplest way to implement the conditions of the coupling of different shells could be realized. Due to the above considerations we choose next functions as allowed:

$$u_x, u_z, \theta_s, N_x, N_z, M_s, E_\theta, B_\zeta \quad (14)$$

where u_x, u_z – the radial and axial movement; N_x, N_z – radial and axial force; E_θ, B_ζ – the electric and magnetic induction fields, which are expressed in terms of displacement u, w and N_s, Q_s force the following way

$$\begin{aligned} N_x &= N_s \cos \varphi + Q_s \sin \varphi; \quad N_z = N_s \sin \varphi - Q_s \cos \varphi; \\ u_x &= u \cos \varphi + w \sin \varphi; \quad u_z = u \sin \varphi - w \cos \varphi. \end{aligned} \quad (15)$$

where φ – the angle between the normal to the coordinate surface and the rotational axis. After some transformations and taking into account (14), (15) we obtain the following coupled system of nonlinear differential equations in the Cauchy form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial s} &= \frac{1 - \nu_s \nu_\theta}{e_s h} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \cos \varphi + \frac{\nu_\theta \cos \varphi}{r} u_x + \frac{1}{R_s} u_z - \sin \varphi \theta_s - \frac{\cos \varphi}{2} \theta_s^2; \\ \frac{\partial u_z}{\partial s} &= \frac{1 - \nu_s \nu_\theta}{e_s h} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \sin \varphi + \frac{\nu_\theta \sin \varphi}{r} u_x - \frac{1}{R_s} u_z + \cos \varphi \theta_s - \frac{\sin \varphi}{2} \theta_s^2; \\ \frac{\partial \theta_s}{\partial s} &= \frac{12(1 - \nu_s \nu_\theta)}{e_s h^3} M_s - \frac{\nu_\theta \cos \varphi}{r} \theta_s; \\ \frac{\partial N_x}{\partial s} &= \frac{\cos \varphi}{r} \left(\nu_s \frac{e_\theta}{e_s} - 1 \right) N_x + \left(\frac{1}{R_s} + \frac{\nu_\theta \sin \varphi}{r} \right) N_z + \frac{e_\theta h}{r^2} \cos \varphi u_x - \\ &- \cos \varphi (P_s + \rho F_s^\wedge) - \sin \varphi (P_\zeta + \rho F_\zeta^\wedge) + \rho h \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_z}{\partial s} &= -\frac{\cos\varphi}{r}N_z - \frac{1}{R_s}N_x - \sin\varphi(P_s + \rho F_s^\wedge) + \cos\varphi(P_\zeta + \rho F_\zeta^\wedge) + \rho h \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}; \\
\frac{\partial M_s}{\partial s} &= \frac{\cos\varphi}{r} \left(v_s \frac{e_\theta}{e_s} - 1 \right) M_s + \frac{e_\theta h^3 \cos^2\varphi}{12 r^2} \theta_s - \cos\varphi N_z + \sin\varphi N_x + \\
&+ (\cos\varphi N_x + \sin\varphi N_z) \theta_s - v_s \frac{e_\theta \sin\varphi}{e_s r} M_s \theta_s - \frac{e_\theta h^3 \cos\varphi \sin\varphi}{12 r^2} \theta_s^2; \\
\frac{\partial B_\zeta}{\partial s} &= -\sigma_2 \mu_3 E_\theta - \frac{(B_s^+ - B_s^-) \mu_3}{\mu_1 h} - \\
&- \sigma_2 \mu_3 \left[0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \sin\varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos\varphi \right) (B_s^+ + B_s^-) - \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \cos\varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin\varphi \right) B_\zeta \right]; \\
\frac{\partial E_\theta}{\partial s} &= -\frac{\partial B_\zeta}{\partial t} - \frac{\cos\varphi}{r} E_\theta.
\end{aligned} \tag{16}$$

Components of ponderomotive Lorentz force are

$$\begin{aligned}
\rho F_s^\wedge &= -h J_{\theta cm} B_\zeta + \sigma_1 h \left[E_\theta B_\zeta + 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \sin\varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos\varphi \right) B_\zeta (B_s^+ + B_s^-) - \right. \\
&\left. - \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \cos\varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin\varphi \right) B_\zeta^2 \right]; \\
\rho F_\zeta^\wedge &= 0.5 h J_{\theta cm} (B_s^+ + B_s^-) + \sigma_3 h \left\{ -0.5 E_\theta (B_s^+ + B_s^-) - \right. \\
&\left. - \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \sin\varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos\varphi \right) \left[0.25 (B_s^+ + B_s^-)^2 + \frac{1}{12} (B_s^+ - B_s^-)^2 \right] + \right. \\
&\left. + 0.5 \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} \cos\varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin\varphi \right) B_\zeta (B_s^+ + B_s^-) \right\}.
\end{aligned} \tag{17}$$

Here B_s^\pm – means $B_s^\pm = B_{s0}^\pm + B_{s0} - B_{\zeta 0} \theta_s + B_\zeta \theta_s$, where B_{s0}^\pm – the components of the magnetic induction of the initial intrinsic magnetic field caused by the electric current; B_{s0} – components of the external magnetic field obtained by solving the problem of statics; B_ζ – normal component of the magnetic induction of the shell; $h = h(s)$ – the shell thickness.

Obtained coupled allowing system of nonlinear differential equations of order eight (16) describes the stress-strain state of flexible current-carrying orthotropic shells of rotation with an arbitrary meridian shape having orthotropic electrical conductivity, magnetic and electrical permittivity. Components of the Lorentz force consider the speed of shell deformation, an external magnetic field, the size and intensity of the conduction current relatively to the external magnetic field.

Accounting for nonlinearity in the equations of motion causes nonlinearity in the ponderomotive force. Adding to the resulting system of equations initial and boundary conditions we obtain the boundary value problem. In the vector form nonlinear boundary value problem is:

equations of movement

$$\frac{\partial \vec{N}}{\partial s} = \vec{F} \left(s, t, \vec{N}, \frac{\partial \vec{N}}{\partial t}, \frac{\partial^2 \vec{N}}{\partial t^2} \right), \quad \left(\begin{array}{l} s_0 \leq s \leq s_N, \\ t_0 \leq t \leq t_N \end{array} \right), \tag{18}$$

boundary conditions

$$\vec{g}_1(\vec{N}(s_0, t)) = \vec{b}_1^*, \quad \vec{g}_2(\vec{N}(s_N, t)) = \vec{b}_2^*, \quad (19)$$

initial conditions

$$\vec{N} = 0, \quad \frac{\partial \vec{N}}{\partial t} = 0, \quad \text{npu } t = 0. \quad (20)$$

Here: $\vec{N} = \{u, w, \theta_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\zeta\}^T$ – column vector of the unknown functions; $\vec{F}, \vec{g}_1, \vec{g}_2, \vec{b}_1^*, \vec{b}_2^*$ – in general case nonlinear vector functions.

Solving of magnetoelasticity boundary values problems associated with the essential computational difficulties. This is because the resolution of the system of equations (16) is a system of differential equations of hyperbolic-parabolic type of eighth-order with variable coefficients. The problems of determining the stress-strain state of investigated shells at nonstationar mechanical and magnetic impacts, the boundary value problem (18), (19) are solved for a fixed moments of time. Partial derivatives by time coordinate are approximated by finite expressions of Newmark implicit scheme, after application of which we obtain the boundary value problem for a system of nonlinear ordinary differential equations in the form

$$\frac{d\vec{N}}{ds} = \vec{F}(s, \vec{N}), \quad (21)$$

and corresponding boundary conditions

$$D_1 \vec{N} \Big|_{s=s_0} = \vec{d}_1; \quad D_2 \vec{N} \Big|_{s=s_N} = \vec{d}_2, \quad (22)$$

Using the method of quasi-linearization boundary value problem (21), (22) is reduced to a sequence of linear boundary value problems, which can be written in abbreviated form

$$\frac{d\vec{N}^{k+1}}{ds} = \vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k), \quad (23)$$

$$B_1(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_0) = \vec{b}_1(\vec{N}^k), \quad B_2(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_N) = \vec{b}_2(\vec{N}^k), \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (24)$$

where $\vec{N} = \{u, w, \theta_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\zeta\}^T$; \vec{N}^{k+1} and \vec{N}^k – solutions on $k+1$ -th and k -th iterations correspondingly; $\vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k)$ – vector of the right part of the equations system; $\vec{B}_1(\vec{N}^k), \vec{B}_2(\vec{N}^k), \vec{b}_1(\vec{N}^k), \vec{b}_2(\vec{N}^k)$ – matrices and right parts of the boundary conditions correspondingly. At the last stage each of linear boundary value problems (23), (24) is solved by discrete orthogonalization method which ensures stable computational process due to orthogonalization procedure for vectors-solutions of the Cauchy problem in the individual integration points. A description of the algorithm and program for solving nonlinear boundary value problems of magnetoelasticity of flexible current-carrying orthotropic shells of rotation is given.

Developed algorithm for solving a new class of magnetoelasticity problems for current-carrying orthotropic shells of rotation having orthotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity, allows to obtain solutions in a wide range of geometrical parameters of the shell, the mechanical characteristics of the material, surface and contour stresses, the boundary contours fixing type, electromagnetic field parameters. The algorithm is constructed in such a way that on the one hand he has enough common sense in the context of physical

formulation and on the other hand has the versatility to solve problems for different types of shells. It also has the property that its structure can be used in the case of selecting a different theory of shells. Also it allows one use of different interpolation formulas for calculating the right side of the system of equations. The developed algorithm is implemented as a software program in Visual Fortran for PC. The program has a modular structure. Most of the modules that implement certain parts of the computational process are standard. The analysis of the reliability of the obtained results was performed which consisted of the evaluation of convergence of problem-solving process by approximations as well as a comparison of the solutions of the problems in different mathematical formulation. On the basis of the developed method the stress-strain state of isotropic current-carrying circle plate and a conical shell under the influence of mechanical force, an external electric current and an external magnetic field were calculated. As follows from the results of comparisons with the increase of forces action duration and a decrease of the time-step the difference between the values of deflection and stress in various steps increases slightly. The obtained numerical data for the fourth and fifth approximations practically coincides indicating a satisfactory convergence of the iterative process. Results of the comparisons in the isotropic setting with the findings of other authors show the possibility of using the proposed approach for the study of stress-strain state of flexible current-carrying orthotropic shells of rotation having orthotropic conductivity.

The fifth chapter is devoted to the analysis of electromagnetic effects and stress-strain state of flexible current-carrying orthotropic shells of rotation due to orthotropic electrical conductivity in a nonlinear formulation, which are in time-dependent magnetic field. A study of the stress-strain state of flexible orthotropic conical shell of boroaluminum of constant thickness $h = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, under mechanical stress $P_\zeta = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ H / m}^2$ was performed. The shell is in an external magnetic field $B_{s_0} = 0.1 \text{ Tn}$ and is applied by the external electrical current of $J_{\theta CT} = -5 \cdot 10^4 \sin \omega t \text{ A / m}^2$, density. The shell has a finite orthotropic conductivity $\sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. Note that in this case the anisotropy of specific electrical resistivity is $\eta_3 / \eta_1 = 2.27$. The influence of taper on the nonlinear behavior of orthotropic shell is considered. The problem was solved with such boundary conditions: small-radius contour $s = s_0$ is stressed by shear force Q_s and is free in the normal direction; the time-variable magnetic induction is given by $B_\zeta = 0.3 \sin \omega t$, where ω – the angular frequency; the second contour $s = s_N$ is rigidly fixed at zero magnetic induction $B_\zeta = 0$. It was revealed that the interaction of magnetic induction and shear force causes appearing of extreme values of deflection and stresses, the electric field intensity and the magnetic induction. Note that the magnetic induction and the shear force are given on the left contour of the shell (boundary conditions) and at the same time shear force Q_s and the normal component of the magnetic induction B_ζ are in the opposite directions. It was founded that a decrease of the cone angle leads to the absolute values of deflection

and mechanical stresses, electric field and magnetic induction intensities increasing. At $\varphi = \pi/30$ the maximum values of these functions significantly increases as compared with the maximum values for other angles and shifted to s_0 . This fact illustrates the interconnection between electromagnetic and mechanical fields. It was revealed that the cone opening angle equals to six degrees proved critical for the considered geometrically nonlinear shell at selected loadings. Further reduction of the angle ($\varphi = \pi/30$) leads to buckling of the shell. Based on the results we can consider the influence of the cone angle on the stress- strain state of orthotropic shell, taking into account that the angle φ complements angle at the base of the cone to 90° . Note that the oscillatory processes occurring in the shell having orthotropic conductivity in a magnetic field in its mechanical meaning correspond to vibrational processes of a shell which is under the influence of mechanical stress only. This is yet another confirmation of the right choice of the method and the correctness of the obtained equations.

The influence of nonlinearity accounting on the behavior of the current-carrying orthotropic shell in a magnetic field was investigated. To analyze the non-linearity impact accounting on the stress-strain state of orthotropic conical shell comparison of the solutions obtained in the linear and nonlinear formulations is made. The problem was solved with such boundary conditions: small-radius contour $s = s_0$ stressed by shear force Q_s and is free in the normal direction; the time-variable magnetic induction is $B_\zeta = 0.3 \sin \omega t$, where ω – the angular frequency; the second contour $s = s_N$ is rigidly fixed at zero magnetic induction $B_\zeta = 0$. The value of $B_{\zeta 0}$, satisfying the magnetostatic problem was chosen as the average value of the solutions of the nonlinear problem and assumed to be equal $B_{\zeta 0} = -0,79 \cdot 10^{-3} T\lambda$. A comparison was made of the value of deflection w , peripheral mechanical strain σ_θ^+ on the outer surface of the shell, the normal component of the magnetic field induction B_ζ and the meridional component of the Lorentz force F_s^{\wedge} , depending from s for angles $\varphi = \pi/30, \pi/15$ in linear and nonlinear formulations. The values of functions were taken at $t = 5 \cdot 10^{-3} c$, where they reach maximum values. Considering the values of the functions for the angle $\varphi = \pi/30$, note that the difference between the maximum values of deflection w in two theories (contour $s = s_0$) is 27 %; for σ_θ^+ at $s = 0,08M$ reaches 97%; B_ζ at $s = 0,04M$ reaches 41%; F_s^{\wedge} at $s = s_0$ are almost equal, the difference is 0.3 %. Considering the angle $\varphi = \pi/15$, we could mention the coincidence of the results both for the linear and nonlinear theories at their maximum values. It was found that the difference between the solutions of linear and nonlinear theories increasing with decreasing of the angle φ (increasing the angle of the cone). At the same time it should be noted a significant difference in the linear and nonlinear theories for stress, magnetic induction and the Lorentz force when approaching to the right side of the shell ($s = 0.28; 0.32; 0.36M$). Analyzing the results obtained we can consider the influence of geometric nonlinearity on the stress-strain state of orthotropic shells in comparison with the linear theory. It was investigated the

stress-strain states of flexible shells in nonlinear formulation based on comparison of the solutions obtained for the current-carrying orthotropic cone of beryllium and current-carrying isotropic cone of aluminum, as well as for the isotropic cone of aluminum in the absence of a magnetic field and the external current. In all three cases the distribution of the deflection is non-linear and its maximum values occur in the left contour of the shell. Thus, in the case of beryllium orthotropic cone and the cone of isotropic alumina, considering the maximum value of the magnetic field deflection differs by about two times. It was revealed that in the case of the isotropic cone without influence of the magnetic and electric fields the deflection increases significantly ($w/h_0 = 4$). This is because in the absence of an electric field acting on the shell the tensile strength of the tangential component of the magnetic induction (B_s^\pm) and the tangential component of the Lorentz force (ρF_s^\wedge) is equals to zero. In this case the shell becomes more ductile, i.e. flexible with respect to the deflection. The absence of a magnetic field ($B_\zeta = 0$) also leads to an increase in deflection. The influence of the change in thickness on the stress- strain state of orthotropic conical shell was investigated. The following conditions of the shell contours fixing are chosen: the contour of small radius $s = s_0$ hinged and time-variable magnetic induction B_ζ , is setting, and the second contour $s = s_N$ is free in the meridional direction at the zero magnetic induction. The behavior of orthotropic shell depending on the variation of the thickness of the shell was investigated. The task for orthotropic beryllium cone of variable thickness $h = 5 \cdot 10^{-4} (1 - \alpha \frac{s}{s_N})$ is calculated for different values of the parameter $\alpha = \{0.2; 0.3; 0.4; 0.5\}$ characterizing the thickness variability in the meridional direction. It was found that increasing of the parameter α value leads to increasing of the deflection, peripheral shell stresses $\sigma_{22}^\pm(s)$, Maxwell stresses $T_{22}^+(s)$ etc. As can be seen from the obtained results variability of thickness has a significant effect on the stress-strain state of the shell, which needed to be mentioned in practical calculations.

The stress-strain state of a current-carrying flexible orthotropic beryllium cone of variable thickness for different types of fixing the contours of the shell was investigated. From these results it is clear that the boundary conditions of shell contours fixing significantly affect the value and distribution of deflections, shear forces and bending moments, Lorentz force, the magnetic induction and electric field intensity. It was revealed that the maximum deflections and bending moments, the Lorentz force, the magnetic induction and electric field intensity arise during "hinge- sliding" boundary conditions. Numerical results are obtained with a hinged shell contours fixing for the cases when magnetic induction and electric field intensity set on the left contour. It was found that in the presence of the magnetic induction in the left contour of the shell the values of deflections, bending moments, Lorentz force, the magnetic induction and the electric field intensity is much higher compared to the presence of an electric field. Due to results we can conclude about the influence of boundary conditions on the interrelatedness of mechanical and electromagnetic fields.

It was analyzed the influence of external magnetic induction on the stress state of orthotropic shell in the geometrically nonlinear formulation. Orthotropic truncated conical shell of beryllium of variable thickness is influenced by the mechanical force $P_\zeta = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t H / M^2$, of an external electric current $J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^5 \sin \omega t A / M^2$, and the external magnetic field $B_{S_0} = 0.1 T\lambda$, and the shell has a finite orthotropic electrical conductivity $\sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. In this case the combined stress consisting of a ponderomotive Lorentz force of external magnetic field and mechanical strength act on the shell. The problem was solved with such boundary conditions: the circuit of small radius $s = s_0$ hinged and is given by the time-variable magnetic induction B_ζ , and the second contour $s = s_N$ is free in the meridional direction at the zero magnetic induction.

It was investigated the behavior of orthotropic shell depending on changes in the external normal component of the magnetic induction B_{ζ_0} . It is shown that a change in the normal component of the external magnetic induction significantly changes the stress state of the shell and its electromagnetic field. It is found that with increasing of magnetic induction deflection of the shell increases. Increasing of the external magnetic field increases the magnitude of the mechanical stress of the shell. The change of the magnitude of the internal magnetic field induction of the shell depending on the external magnetic field and the orthotropic electrical conductivity was investigated.

It is established that an increase in external magnetic field induction also increases induction of the internal magnetic field. This corresponds to a real physical processes occurring in the shell and, in turn, confirms the accuracy of the obtained results.

A study of the stress-strain state of orthotropic conical shell of variable thickness depending on variation of an external electric current was performed. Shell of beryllium is exposed to mechanical force $P_\zeta = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t H / M^2$, the external magnetic field $B_{S_0} = 0.1 T\lambda$, an external electric current $J_{\theta CT} = J_{\theta CT} \sin \omega t A / M^2$ ($J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^5, 5 \cdot 10^7, -5 \cdot 10^7, -8 \cdot 10^5, -1 \cdot 10^8$), and the shell has a finite orthotropic electrical conductivity $\sigma(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. In this case the anisotropy of specific electrical resistivity of beryllium is $\eta_3 / \eta_1 = 4.07$. Problem was solved with such boundary conditions: small-radius contour $s = s_0$ pivoted and the time-variable magnetic induction B_ζ , is given, and the second contour $s = s_N$ is free in the meridional direction at the zero magnetic induction.

It was shown that by choosing the value of the density and orientation of the external current taking into account orthotropic conductivity it is possible to optimize the stress state of the shell being under the influence of non-stationary electromagnetic and mechanical fields. It was revealed that the increase in the value of an external electric current leads to an increase in the values of deflections and stresses of shell, tangential and normal components of the Lorentz forces.

When the direction of the external current changes the direction of ponderomotive forces action coincide with the direction of the normal component

of the mechanical stress which leads to qualitative and quantitative change in the deflection and stresses of the shell , as well as electromagnetic field parameters. Thus choosing the direction and magnitude of density of outer electric current one can achieve minimum deflection and stresses in the shell.

Analyzing the results of the presented calculations we should note that they do not contradict the mechanical and physical representation of the processes occurring in the shell under the electromagnetic and mechanical influence.

CONCLUSION

1. The mathematical formulation of the problem of the nonlinear coupled dynamic magnetoelasticity of current-carrying shells taking into account the anisotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity was made.

2. A nonlinear two-dimensional model of current-carrying magnetoelasticity orthotropic shells with respect to orthotropic conductivity and magnetic permittivity in the geometrically nonlinear formulation was made. It was assumed that the main directions of orthotropic material properties of the shell coincide with the directions of the corresponding coordinate axes, as well as orthotropic body is linear relatively to the magnetic and electrical properties.

3. On the basis of the quadratic version of geometrically nonlinear theory of shells and plates, coupled allowing system of nonlinear differential equations of magnetoelasticity was built. This system describes the stress-strain state of flexible current-carrying orthotropic shells of rotation of arbitrary meridian under the influence of time-dependent mechanical and electromagnetic stresses due to orthotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity.

4. The development of the technique and algorithm for numerical solution of new class of coupled dynamic problems of magnetoelasticity which allows us to investigate the stress-strain state of the current-carrying orthotropic shells of rotation with regard to orthotropic electrical conductivity and magnetic permittivity in geometrically nonlinear formulation. On the basis of the developed method the stress-strain state of isotropic current-carrying circle plate and a conical shell under the influence of mechanical force, an external electric current and an external magnetic field was performed. As follows from the results of comparisons with the increase of duration of forces action and a decrease of the time step the difference between the values of deflections and stresses in various steps increases slightly. The numerical data obtained for the fourth and fifth approximations practically coincide indicating a satisfactory convergence of the iterative process. Results of the comparisons in the isotropic setting with the data of other authors show the possibility of using the proposed approach for the study of stress-strain state of flexible current-carrying orthotropic shells of rotation having orthotropic conductivity.

5. The influence of taper on the nonlinear behavior of orthotropic shell was considered. It was revealed that the interaction of magnetic induction and shear force causes extreme values of deflection and stresses, electric field and magnetic induction intensity. Note that the magnetic induction and the shear force are given on the left contour of the shell (boundary conditions) and at the same time shear

force and the normal component of the magnetic induction are in opposite directions. It was found that a decrease in the cone angle leads to absolute values of deflection and stresses, electric field and magnetic flux density increase. This fact illustrates the interconnection of electromagnetic and mechanical fields. It was revealed that the cone angle equal to six degrees proved to be critical for the considered geometrically nonlinear shell at the selected loadings. Further reduction of the angle leads to buckling of the shell.

6. The stress-strain state of flexible shells in nonlinear formulation based on comparison of the solutions obtained for the current-carrying orthotropic cone of beryllium and current-carrying isotropic cone of aluminum, as well as for the isotropic cone of aluminum in the absence of a magnetic field and the external current was investigated. In all three cases the distribution of the non-linear deflection and its maximum values occur in the left contour of the shell. At the same time in the case of beryllium orthotropic cone and the isotropic cone of aluminum, considering the magnetic field maximum values of deflection differ by about two times. It was revealed that in the case of the isotropic cone without influence of the magnetic and electric fields, the deflection increases significantly. This is because in the absence of an electric field acting on the shell, the tensile strength of the tangential component of the magnetic induction, and the tangential component of the Lorentz force equals to zero. The results of decisions received in linear and nonlinear statements are compared. It was found that the difference between the results of solutions of linear and nonlinear formulations increase with decreasing of angle of the cone. Analyzing the results obtained it is possible to consider the influence of the geometric nonlinearity on the stress- strain state of orthotropic shells in comparison with the linear theory.

7. Numerical results for orthotropic beryllium cone of variable thickness for different values of " α ", parameter characterizing variability of thickness in the meridional direction were obtained. It was found that increasing the value of " α " increases the deflection, peripheral stresses of the shell, Maxwell stresses, etc. As can be seen from the results variability of thickness has a significant effect on the stress-strain state of the shell, which should be taken into account in practical calculations. The stress-strain state of a current-carrying flexible orthotropic beryllium cone of variable thickness for different types of the contours fixing of the shell was investigated. From these results it is clear that the boundary conditions of the shell contours fixing significantly affect the value and distribution of deflections, shear forces and bending moments, Lorentz forces, the magnetic induction and electric field intensity.

It was revealed that the maximum deflections and bending moments, Lorentz forces, the magnetic induction and electric field intensity arise at "hinge-sliding" boundary conditions. It was found that in the presence of magnetic induction on the left contour of the shell the values of deflections, bending moments, Lorentz forces, the magnetic induction and the electric field intensity is much higher compared to the presence of an electric field. Due to these results we can consider the influence of boundary conditions on the interconnectedness of mechanical and electromagnetic fields.

8. It was found that with increasing of magnetic induction the deflection and stress of the shell also increases. It was established that an increase in external magnetic field induction also increases induction of the internal magnetic field. This corresponds to a real physical processes occurring in the shell and in turn confirms the accuracy of the results.

It was shown that by choosing the value of the density and orientation of the external current due to orthotropic conductivity it is possible to optimize the stress state of the shell which is under the influence of non-stationary electromagnetic and mechanical fields. It was revealed that the increase in the value of an external electric current leads to an increase in the values of deflections and stresses of the shell, tangential and normal components of the Lorentz forces. Thus choosing the direction and magnitude of the electric current density one can achieve minimum deflection and stresses in the shell.

9. In the considered problems the dependences of values for characteristic functions of the stress-strain state of the electromagnetic parameters, in particular from the orthotropic electrical conductivity and of orthotropic of material properties which allows one to evaluate the impact of the interconnection of fields were made. Using the resulting system of coupled equations of magnetoelasticity of orthotropic shells of rotation, developed techniques for solving problems in the theory of non-stationary current-carrying shells considering orthotropic electrical conductivity in geometrically nonlinear formulation allows one to solve a new class of problems. At the same time the influence of orthotropic electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity of the material and the actual working conditions of structural elements are taken into account more fully that allows one to make a choice of rational geometrical, mechanical and electromagnetic parameters to improve the reliability of the construction.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Мольченко Л.В., Индиаминов Р.Ш. Учет влияния комбинированного нагружения на напряженное состояние конической оболочки, находящейся в магнитном поле // Докл. АН РУз. – Ташкент, 1993. – № 6. – С. 21-22.

2. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индиаминов Р.Ш. Нелинейное деформирование конической оболочки, находящейся в магнитном поле // Прикладная механика. – Киев, 1997. – № 3 (33). – С. 58-63.

MoI'chenko L.V., Loss I.I., Indiaminov R.SH. Nonlinear Deformation of Conical Shells in Magnetic Fields // Int. Appl. Mech. – New York, 1997. – Vol. 33. – No.3. – P. 221-226. (Перевод статьи 2).

3. Индиаминов Р.Ш. Анализ электромагнитных эффектов и напряженно-деформированного состояния токнесущей конической оболочки при комбинированном нагружении // СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси. – Самарканд, 2000. – № 1. – С. 24-26.

4. Индиаминов Р.Ш. Нелинейное деформирование конической оболочки, находящейся в магнитном поле // Узбекский журнал «Проблемы механики» – Ташкент, 2000. – № 6. – С. 39-45.

5. Индиаминов Р.Ш. Математическое моделирование магнитоупругих колебаний анизотропной пластинки на упругом основании // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2004, – № 5-6. – С. 15-19.

6. Индиаминов Р.Ш. О численном исследовании нестационарных задач магнитоупругости гибких конических оболочек // Проблемы архитектуры и строительства: научно–техн. журн. – Самарканд, 2004, – № 2. – С. 28-32.

7. Ширинкулов Т.Ш., Индиаминов Р.Ш., Кулдошев А.Т. Изгиб составных анизотропных (неортоотропных) оболочек и пластин // Проблемы архитектуры и строительства: научно–техн. журн. – Самарканд, 2004. – № 4. – С. 79-83.

8. Индиаминов Р.Ш. Устойчивость анизотропной пластинки на упругом ортотропном основании при наличии внешнего магнитного поля // Проблемы архитектуры и строительства: научно–техн. журн. – Самарканд, 2005. – № 1. – С. 32-35.

9. Индиаминов Р.Ш. Нелинейное деформирование слоистых токнесущих оболочек, находящихся в нестационарном магнитном поле // Узбекский журнал «Проблемы механики». – 2005. – № 5-6. – С. 15-19.

10. Ширинкулов Т.Ш., Индиаминов Р.Ш. О магнитоупругих колебаниях анизотропных пластин, взаимодействующих с деформируемыми средами // Докл. АН РУз. – Ташкент, 2006. – № 2. – С. 36-40.

11. Ширинкулов Т.Ш., Индиаминов Р.Ш. Изгиб физически нелинейных вязкоупругих тонких пластинок // Докл. АН РУз. – Ташкент, 2007. – № 2. – С. 20-26.

12. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индиаминов Р.Ш. Розв'язуюча система нелінійних рівнянь магнітопружності для одношарових ізотропних оболонок обертання змінної жорсткості // Вісник Київського Національного Університету ім. Т.Г. Шевченка. Серія: фізико-математичні науки. – Киев, 2007. Вип. – № 1. – С. 87-92.

13. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индиаминов Р.Ш. Магнітопружність конічної оболонки з врахуванням ортотропної електропровідності в геометрично нелінійній постановці // Вісник Київського Національного Університету ім. Т.Г. Шевченка. Серія: фізико-математичні науки. – Киев, 2007. Вип. – № 2. – С. 85-90.

14. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индиаминов Р.Ш. Магнітопружне деформування ортотропних оболонок обертання з ортотропною електропровідністю // Вісник Київського Національного Університету ім. Т.Г. Шевченка. Серія: математика-механика. – Киев, 2008. Вип. – № 19-20. – С. 53-59.

15. Мольченко Л.В., Индиаминов Р.Ш., Лоос И.И. Дослідження електро-магнітних ефектів зрізаного гнучкого параболоїда обертання в осесиметричній постановці // Вісник Київського Національного Університету ім. Т.Г. Шевченка. Серія: фізико-математичні науки. – Київ, 2008. Вип. – № 4. – С. 83-87.

16. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индиаминов Р.Ш. К определению напряженного состояния гибких ортотропных оболочек вращения в магнитном поле // Прикладная механика. – Киев, 2008. – № 8 (44). – С. 64-76.

Moľchenko L.V., Loss. I.I., Indiaminov R.SH. Determining the Stress State of Flexible Orthotropic Shells of Revolution in Magnetic Field // Int. Appl. Mech. – New York, 2008. – Vol. 44. – No.8. – P. 882 - 891. (Перевод статьи 16).

17. Индиаминов Р.Ш. Об отсутствии влияния тангенциальной составляющей силы Лоренца на осесимметричное напряженное состояние токонесущей конической оболочки // Вычислительные технологии. – Новосибирск, 2008. – № 6 (13). – С. 66-78.

18. Индиаминов Р.Ш. Исследование деформирования токонесущей ортотропной конической оболочки в нестационарном магнитном поле // Узбекский журнал «Проблемы механики». – 2009, – № 5-6. – С. 13-18.

19. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индиаминов Р.Ш. Напряженно-деформированное состояние гибких кольцевых пластин переменной жесткости в магнитном поле // Прикладная механика. – Киев, 2009. – № 11(45). – С. 106-114.

Moľchenko L.V., Loss. I.I., Indiaminov R.SH. Stress-Strain State of Flexible Ring Plates of Variable Stiffness in a Magnetic Field // Int. Appl. Mech. – New York, 2009. – Vol. 45. – No.11. – P. 1236-1242. (Перевод статьи 19).

20. Индиаминов Р.Ш. Исследование влияния граничных условий на напряженно-деформированное состояние токонесущей ортотропной оболочки // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2012. – № 3. – С. 13-17.

21. Индиаминов Р.Ш., Дониёров А. А. Нелинейные колебания токонесущей ортотропной оболочки в переменном магнитном поле // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2012. – № 9. – С. 73-78.

22. Индиаминов Р.Ш. Решение связанных динамических задач магнитоупругости гибких токонесущих оболочек // Вестник Джизакского государственного педагогического института. – Джизак, 2013. – № 1. – С. 20-25.

23. Indiaminov R.Sh., Saidov U.M., Nuriyev S.A., Narqulov A. Toktashuvchi yuqqa halqaviy plastinkaning kuchlanganlik holatiga ponderomotor kuchlarning ta'sirini tekshirish // Вестник Джизакского государственного педагогического института. – Джизак, 2013. – № 1. – С. 16-20.

24. Индиаминов Р.Ш., Каюмов А.А., Гуломов А.И. Нелинейные колебания токонесущей ортотропной цилиндрической оболочки в магнитном поле // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2013. – № 2. – С. 133-140.

25. Индиаминов Р.Ш., Кадиров Т., Казоков У. Учет влияния конусности на нелинейное деформирование токонесущей ортотропной конической оболочки, обладающей ортотропной электропроводностью // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2013. – № 7. – С. 250-255.

26. Indiaminov R.Sh. Nonlinear oscillations current carry orthotropic shell in a magnetic field // Open Journal of Applied Science. – New York, 2013. Vol.3. – № 4. – P. 318-321.

П бўлим (II часть; II part)

27. Индиаминов Р.Ш. Оценка вклада нагрузок при комбинированном нагружении на напряженное состояние конической оболочки, находящейся во внешнем магнитном поле // Современные проблемы математики: Тр. междунар. конф. Т.2. – Самарканд, 1996. – С. 145.

28. Индиаминов Р.Ш. Влияние внешнего магнитного поля на напряженно-деформированное состояние усеченной конической оболочки // Актуальные проблемы современной науки и технологии: Тр. респ. научно-практ. конф. – Джизак, 2004. – С. 63-67.

29. Индияминов Р.Ш. Учет влияния угла конусности на напряженно-деформированное состояние конической оболочки, находящейся в магнитном поле // Инфокоммуникационные и вычислительные технологии в науке, технике и образовании: Материалы междунар. конф. – Ташкент, 2004. – С. 208-210.
30. Индияминов Р.Ш. Исследование нестационарных задач магнито-упругости гибких электропроводящих конических оболочек // Дифференциальные уравнения с частными производными и родственные проблемы анализа и информатики: Тр. междунаучной конф. Т.1. – Ташкент, 2004. – С. 160-165.
31. Индияминов Р.Ш. О численном исследовании нестационарных задач магнитоупругости гибких оболочек // Современные проблемы математической физики и информационных технологий: Тр. междунар. конф. Т.2. – Ташкент, 2005. – С.168-172.
32. Индияминов Р.Ш. Об электромагнитной нагрузке и напряженно-деформированном состоянии токнесущей конической оболочки // Достижения науки в области строительной механики и инженерных сооружений: Материалы междунар. научно-техн. конф. Т.1. – Алматы, 2005. – С. 253-257.
33. Индияминов Р.Ш. Деформирование конической оболочки находящейся в магнитном поле // Физическая электроника: Тр. IV междунар. конф. – Ташкент, 2005. – С. 83-87.
34. Индияминов Р.Ш. Устойчивость токнесущей анизотропной пластинки на упругом основании // Вычислительная механика деформируемого твердого тела: Тр. междунар. научно-техн. конф. Т.1. – Москва, 2006. – С. 206-209.
35. Индияминов Р.Ш. Математическое моделирование деформирования электропроводящих слоистых оболочек в магнитном поле // Современные проблемы и перспективы механики: Материалы междунар. научно-техн. конф. – Ташкент, 2006. – С. 273-276.
36. Ширинкулов Т.Ш., Индияминов Р.Ш. О напряженно-деформированном состоянии физически нелинейных вязкоупругих тонких пластинок // Современные проблемы и перспективы механики: Материалы междунар. научно-техн. конф. – Ташкент, 2006. – С. 437-442.
37. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индияминов Р.Ш. Решение задач магнитоупругости кольцевых пластин // Современные проблемы и перспективы механики: Материалы междунар. научно-техн. конф. – Ташкент, 2006. – С. 309-311.
38. Ширинкулов Т.Ш., Индияминов Р.Ш., Бобоназаров Ш.П. Деформирование токнесущей ортотропной цилиндрической оболочки в переменном магнитном поле // Современные проблемы механики: Материалы междунар. научно-техн. конф. Т.1. – Самарканд, 2007. – С. 249-253.
39. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индияминов Р.Ш. Магнитоупругость усеченного гибкого параболоида вращения в геометрически нелинейной постановке // Современные проблемы механики: Материалы междунар. научно-техн. конф. Т.1. – Самарканд, 2007. – С. 148-152.
40. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индияминов Р.Ш. Розрахунок напруженого стану циліндричної оболонки в нестационарному магнітному полі в нелінійній постановці // Сучасні проблеми природничих наук та підготовка фахівців: Тези доповідей XI міжнародної науково-методичної конференції. – Миколаїв, 2007. – С. 19-23.
41. Мольченко Л.В., Лоос И.И., Индияминов Р.Ш. Дослідження напруженого стану ортотропної конічної оболонки в зовнішньому поперечному магнітному полі // Сучасні проблеми природничих наук та підготовка фахівців у цій галузі: Тези доповідей XII-Всеукраїнської науково-методичної конференції. – Миколаїв, 2009. – С. 25-26.
42. Мольченко Л.В., Индияминов Р.Ш. Магнитоупругое деформирование токнесущей ортотропной конической оболочки переменной толщины в магнитном поле // Современные проблемы механики: Материалы междунар. научно-техн. конф. – Ташкент, 2009. – С. 392-396.

43. Индиаминов Р.Ш. Решение задач магнитоупругости ортотропных конических оболочек // Современные проблемы механики: Материалы междунар. научно-техн. конф. Т.1. – Ташкент, 2009. – С. 302-306.

44. Индиаминов Р.Ш. Исследования изгибных колебаний стержня в магнитном поле // Актуальные проблемы механики и машиностроения: Материалы III междунар. научной конф. Т.1. – Алматы, 2009. – С. 205-208.

45. Индиаминов Р.Ш. Исследования напряженного состояния токонесящей ортотропной конической оболочки в магнитном поле // Проблемы современной математики: Тр. научной конф., посвященной 20-летию независимости Республики Узбекистан. – Карши, 2011. – С. 388-392.

46. Индиаминов Р.Ш. Решение связанных динамических задач магнитоупругости токонесящих ортотропных конических оболочек // Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности: Сб. статей одиннадцатой междунар. научно-практ. конф. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 152-158.

47. Индиаминов Р.Ш. Математическое моделирование магнитоупругих колебаний токонесящей ортотропной оболочки в магнитном поле // Современное состояние и перспективы информационных технологий: Материалы Республ. научно – практ. конф. Т.1. – Ташкент, 2011. – С. 96-102.

48. Индиаминов Р.Ш., Дониёров А. А. Влияние внешнего магнитного поля на напряженное состояние токонесящей анизотропной пластинки // Материалы республ. научно-техн. конф. «Информационные технологии и проблемы телекоммуникаций». – Ташкент, 2012. – С. 125-127.

49. Индиаминов Р.Ш., Наркулов А., Казоков У.Ф. Исследование влияния граничных условий на напряженное состояние токонесящей оболочки // Материалы междунар. научно-техн. конф. «Современные проблемы строительных материалов, конструкций, механики грунтов и сложных реологических систем». – Самарканд, 2013. – С. 86-90.

50. Индиаминов Р.Ш., Дониёров А.А., Фуломов А.И., Хайриев Э. Нелинейное деформирование ортотропной цилиндрической оболочки в магнитном поле // Материалы междунар. научно-техн. конф. «Современные проблемы строительных материалов, конструкций, механики грунтов и сложных реологических систем». – Самарканд, 2013. – С. 81-86.

51. Indiaminov R. Sh., Murtazaeva U. Mathematical simulation of magneto-elastic vibrations of current-carrying orthotropic rotation shell in magnetic field // European Science and Technology: materials of the V international research and practice conference. Vol.1. - Munich, Germany, October 3rd – 4th, 2013. – P. 393-398.

