

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ва ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРИШ БЎЙИЧА
16.07.2013.Т/ФМ.29.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ

НУРАЛИЕВ ФАХРИДДИН МУРОДИЛЛАЕВИЧ

ЭЛЕКТРОМАГНИТ МАЙДОНЛАРНИНГ ЮПҚА
ЭЛЕКТР ЎТКАЗУВЧАН ЖИСМЛАРНИНГ ДЕФОРМАЦИОН
ҲОЛАТИГА ТАЪСИР ЭТИШ ЖАРАЁНЛАРИНИ R-ФУНКЦИЯ
УСУЛИДА МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ

05.01.07 – Математик моделлаштириш.
Соғли усуллар ва дастурлар мажмун
(техника фанлари)

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида №30.09.2014/В2014.5.Т302 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Дастурий маҳсулотлар ва аппарат-дастурий мажмуалар яратиш марказида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (Ўзбек, рус, инглиз) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасига (www.tuit.uz) ва «ZIVONET» таълим ахборот тармоғида (www.zivonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Назиров Шодманкул Абдирозиқович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Кавлбергенов Батырбек Тулепбергенович
техника фанлари доктори

Мухамедиева Дилноз Тулкуновна
техника фанлари доктори, профессор

Нормуродов Чори Бегалиевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Этакчи ташкилот:

И.М.Губкин номдаги Россия давлат нефть ва газ университетининг Тошкентдаги филиали

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ва Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги 16.07.2013.Т/ФМ.29.01 рақамли Илмий кенгашнинг «42» ИЮН 2016 йил соат 10.00 даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент ш., Амир Темур кўчаси, 108. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

Докторлик диссертацияси билан Тошкент ахборот технологиялари университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (2516 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100202, Тошкент ш., Амир Темур кўчаси, 108. Тел.: (99871) 238-64-43.

Диссертация автореферати 2016 йил «25» ИЮН куни тарқатилди.
(2016 йил «25» ИЮН даги 4 рақамли реестр баённомаси).



Х.К.Арплов
Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

М.С.Якубов
Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш-илмий котиби ф.д., профессор

Н.Равшанов
Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар
раиси, т.ф.д.

КИРИШ (Докторлик диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда техника соҳасида электромагнит майдонларнинг электр ўтказувчанлик назарияси, хусусан, икки ёки ундан ортиқ физик майдонларнинг ўзаро боғлиқлиги назариясига асосланган тадқиқот ишлари изчил суратларда ривожланмоқда. Жаҳонда магнит эластик датчикларга бўлган талаб ошиб бормоқда, биргина автомобиль ишлаб чиқариш бозорида 2012 йил магнит датчикларнинг сотувидан 812,2 млн. долларлик даромат ташкил қилган бўлса, ушбу кўрсаткич бир йилдан сўнг 2013 йил 9,5% га ошган. Кейинги икки йилда эса мазкур сотувлар 6-7% га ошиши ва 2016 йил охирига келиб 1,1 млрд. АҚШ долларини ташкил этиши кутилмоқда¹.

Ўзбекистонда электромагнит майдонларнинг юпқа электр ўтказувчан жисмларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларига оид тадбирларини самарали ташкил этиш юзасидан кенг қамровли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. Бу борада, жумладан, юпқа мураккаб конструкцион шаклдаги пластина ва қобикларнинг магнитэластиклик даражасини аниқловчи бошланғич ва чегаравий шартли хусусий ҳосилалари дифференциал тенгламаларни ечишнинг сонли-аналитик усуллари ва математик моделини ишлаб чиқиш, магнитокумулятив генераторлар, термойдро қурилмаларида, плазмани сақловчи жиҳозлар, магнитодинамик тезлатгичлар, ҳаракатланаётган тизимнинг контактсиз магнит таянчлари, электромагнит майдоннинг ҳаракатланиш соҳасида ишловчи ўлчов асбобларининг ишлаш механизм ва технологияларини такомиллаштириш ҳамда фойдаланиш муддатини узайтириш ва сифатини янада ошириш.

Дунёда электромагнит майдонларнинг юпқа электр ўтказувчан жисмларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларини моделлаштириш, мураккаб конфигурацияли магнитоэластик пластина ва қобикларнинг асосий чегаравий шартларини қониқтирувчи ечимлар мажмуаси ва тузилмасини R-функция усулида моделлаштириш алгоритмлари ва дастурланган воситаларнинг янги авлодини ишлаб чиқиш алоҳида касб этиб бормоқда. Бу борада мақсадли илмий-тадқиқотларни, жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазибалардан бири ҳисобланади: мураккаб конструкцион шаклдаги юпқа пластинка ва қобикларнинг магнитоэластиклигини ифодаловчи тенгламалар тизимини ечишнинг фазовий ўзгарувчиларга нисбатан дискретлаш ва юпқа жисмларнинг магнитоэластиклик даражаси дискрет моделини қуриш, алгебраик ва оддий дифференциаллар тенгламалар тизимини вектор-матрицали услубларга асосланган ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш; мураккаб шаклдаги юпқа пластина ва қобикларнинг магнитоэластиклик синфига боғлиқлик масалаларини ечиш алгоритмларини R-функция усули ёрдамида юпқа жисмларнинг магнитоэластиклик даражасини ҳисоблашнинг дастурий воситалари

¹ <http://www.digitimes.com>

мажмуини ишлаб чиқиш; мураккаб конструкция шаклдаги юпка пластина ва қобикларнинг деформацион ҳолатига электромагнит майдонининг таъсир этиш даражасини аниқлаш бўйича ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш ва юпка жисмларнинг магнитоэластиклик даражасини таъминлашга боғлиқ статик ва динамик масалаларни ечиш алгоритминини ишлаб чиқиш.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2012 йил 21 мартдаги ПҚ-1730-сон «Замонавий ахборот-коммуникация технологияларини янада жорий этиш ва ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ-1442-сон «2011-2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарорларида ҳамда Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2012 йил 7 мартдаги 64-сон «Саноатда ишлаб чиқариш харажатларини қисқартириш ва маҳсулот таннархини пасайтиришга доир қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги қарорида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи².

Электромагнит майдонларнинг юпка пластиналар ва қобикларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларининг математик моделлари, аналитик ва сонли ечиш усуллари, ҳисоблаш алгоритмлари, дастурий воситаларини ишлаб чиқишга йўналтирилган илмий изланишлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан, Company Fluke, Allegro Microsystems, Purdue University (АҚШ), Infineon Technologies, Cargo Care Solutions, University of Bonn (Германия), Hefei University of Technology, Shanghai Jiaotong University (Хитой), Seoul National University (Жанубий Корея), Yamaha ва Alps Electric, Asahi Kasei Microsystems (Япония), National Technic University of Athena (Греция), Micronas (Швейцария), Melexis (Бельгия), ОАО Электроаппарат, Москва давлат университети (Россия), ОАО Электроизмеритель, Киев миллий университети (Украина), «Фан ва тараққиёт» давлат унитар корхонасида (Ўзбекистон) илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Чизикли эластиклик назарияси доирасида механик, электромагнит ва иссиқлик майдонларнинг боғлиқлик эффектларига оид жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор, жумладан, куйидаги илмий натижалар олинган: электромагнитэластик юпка пластиналар назариясининг физик вариацион тамойиллари асосида Максвелл синфига оид тенгламаларни

² Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи <http://www.criez.com/>, <http://docs.lib.purdue.edu/>, <http://www.cargocaresolutions.com/>, <http://www.sciencedirect.com/>, <http://link.springer.com/>, <http://www.iccm-central.org/>, <http://www.university-directory.eu>, <http://www.digitimes.com/> <https://www.ihs.com/> ва бошқа манбалар асосида ишлаб чиқилган.

ечишда интерполяцион матрица усули ишлаб чиқилган (Hefei University of Technology, Shanghai Jiaotong University, Хитой); математик усуллар ёрдамида магнитоэластик муҳитларда Релей ва Лэмб электромагнитэластик сирт тўлқинлари, Кирхгоф-Ляв ва электромагнит майдонлар гипотезаларига асосан электрэластик юпқа пластина ва қобикларнинг математик моделлари яратилган (National Technik University of Athena, Греция); пьезоэлектрик ва пьезомагнит пластиналар электромагнит-эластиклик хусусий моделлари ишлаб чиқилган (Seoul National University, Жанубий Корея); саноатнинг турли соҳаларида магнитэластик юпқа жисмларнинг кенг кўламда қўлланиши механизми ишлаб чиқилган (Eriez Manufacturing Company, Fluke, АҚШ, Cargo Care Solutions, Германия).

Дунёда электромагнит майдонларнинг юпқа пластиналар ва қобикларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларининг математик моделларини, электрўтказувчан ва пьезоэлектрик жисмлар электромагнит-эластиклик соҳаси, уларнинг чизиқли ва ночизиқли моделларини ишлаб чиқиш бўйича қатор, жумладан, қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: юпқа қобиклар ва пластиналар электромагнитоэластиклик гипотезаларини ривожлантириш, чизиқли ва ночизиқ ҳолларда юпқа пластина ва қобиклар магнитоэластиклик масалаларини ечиш усуллари ва ҳисоблаш алгоритмларини, математик моделлаштириш усулларини ишлаб чиқиш, мураккаб конструкцион шаклдаги юпқа пластина ва қобикларнинг деформацион ҳолатига электромагнит майдонининг таъсир этиш даражасини аниқлаш бўйича ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш ва статик ва динамик масалаларини R-функция усулида ечиш орқали юпқа жисмларнинг магнитоэластиклик даражасини таъминлашга эришиш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Электромагнит майдонларнинг юпқа электр ўтказувчан жисмларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларини моделлаштириш, юпқа мураккаб конструкцион шаклдаги пластина ва қобикларнинг магнитэластиклик даражасини аниқлаш, мураккаб конфигурацияли магнитоэластик пластина ва қобикларнинг асосий чегаравий шартларини қониқтирувчи ечимлар мажмуаси ва тузилмасини R-функция усули ёрдамида шакллантириш, мураккаб конструкцион шаклдаги юпқа пластинка ва қобикларнинг магнитоэластиклигини ифодаловчи тенгламалар тизимини ечиш, фазовий ўзгарувчиларга нисбатан дискретлаш ва юпқа жисмларнинг магнитоэластиклик даражаси дискрет моделини куриш, дифференциаллар тенгламалар тизимини вектор-матрицали услубларга асосланган ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш масалалари бир қатор олимлар: S.Kaliski, K.Hiroyuki (Hefei University of Technology), J.Tani (Shanghai Jiaotong University), D.Georg, Z.B.Kuang (Seoul National University), D.Hasanyan, Д.И.Бардзокас (National Technik University of Athena), С.А.Амбарцумян, Г.Е.Багдасарян, М.В.Белубекян, В.Л.Рвачев, Л.В.Курпа, Л.В.Мольченко (Киев миллий университети), И.Т.Селезов, М.Р.Короткина (Москва давлат университети), Х.А.Рахматулин,

В.К.Кабулов, Ш.А.Назирова, Т.Юлдашев, Р.Индиаминовлар каби чет эл ва мамлакатимиз олимлари илмий-тадқиқот ишларини олиб боришган.

Электромагнитоэластик юпқа пластиналарнинг тенгламалари ва математик моделларини яратиш S.Kaliski, K.Hiroyuki, J.Tani, D.Georg, Л.В.Мольченко, Р.Индиаминов, М.Р.Короткина, электрўтказувчан пластина ва қобикларнинг магнитотермоэластик чизиқли тенгламаларини ечиш усуллари Z.B.Kuang, D.Hasanyan ишларида, магнитоэластиклик соҳасида L.Kporff томонидан юпқа пластина ва қобикларнинг электромагнит майдон билан ўзаро таъсирланувчи Ер магнит майдонининг жисмларга таъсири содда модели ишлаб чиқилган. С.А.Амбарцумян, Г.Е.Багдасарян, М.В.Белубекян, Д.И.Бардзокас, И.Т.Селезов ишлари юпқа жисмлар учун электромагнитоэластиклик гипотезаларини, В.Л.Рвачев, Л.В.Курпа, Ш.А.Назирова R-функция усулини ишлаб чиқиш, Х.А.Рахматулин, В.К.Кабулов, Т.Юлдашев магнитоэластиклик чизиқли ва ночизиқ тенгламаларини ечиш борасида тадқиқотлар олиб боришган.

Электр ва магнитоэластиклик соҳасида олиб борилган деярли барча тадқиқотлар хусусий чегаравий шартлар, қўлланилиш соҳаларида конструкцион тузилиши оддий классик геометрик шаклларга эга юпқа жисмлар, қобиклар (пластиналар)ни ўрганишга қаратилган. Мураккаб геометрик конструкцион конфигурацияга эга бўлган юпқа жисмлар магнитоэластиклиги масалаларини ечиш, яъни табиий чегаравий шартларни инобатга олган ҳолда математик моделлаштириш, алгоритмлаштириш назарияси ва амалиёти нуқтани назаридан тадқиқ қилиш, турли вариантларда конструкцион тузилмалар яратиш масалаларини ечиш йўналишида тадқиқ қилишга бағишланган илмий изланишлар ҳозирги кунда деярли олиб борилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент ахборот технологиялари университети хузуридаги Дастурий маҳсулотлар ва аппарат-дастурий мажмуалар яратиш марказининг илмий тадқиқот ишлари режасининг Ф-1.2.4. «Мухитлар ва майдонлар ўзаро таъсир синф масалаларини ечишни алгоритмлаштириш» (2003-2007), ФА-Ф1-Ф009. «Алгоритмлаштиришнинг металингвистик назариясини ишлаб чиқиш ва уни математик физикавий кўп ўлчамли масалалар ечимларини куришни автоматлаштиришда қўллаш» (2007-2011), Ф4-ФА-Ф005. «Мураккаб конфигурациялар учун математик физика кўп ўлчамли ночизиқли масалалар синфлари ечимлар алгоритмик усуллари ишлаб чиқиш ва тадқиқот қилиш» (2012-1016), ҳамда Ф5-016. «Конструктив R-функция усули асосида оптималлаштиришнинг кўп ўлчовли чизиқли ва ночизиқли масалаларини ечиш усуллари ва воситаларини яратиш» (2012-1016) мавзусидаги фундаментал лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади электромагнит майдонларнинг юпқа электр ўтказувчан жисмларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларини R-функция ва сонли-аналитик усулларида математик моделлаштиришнинг алгоритмлари ва дастурий воситаларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

юпқа пластина ва қобиқларнинг магнитоэластиклик математик моделини ишлаб чиқишда электромагнит кучлар таъсири ости электр-ўтказувчан юпқа жисм материалининг хусусиятлари ва конструкциясини инобатга олган ҳолда чизикли электродинамика ва чизикли эластикликнинг тузилмавий геометрик ва ўзаро физик муносабатларини шакллантириш;

R-функция назарияси ва вариацион усуллардан фойдаланиб юпқа мураккаб конструкция шаклдаги пластина ва қобиқларнинг магнитоэластиклик даражасини аниқловчи бошланғич ва чегаравий шартли хусусий ҳосилалари дифференциал тенгламаларни ечишнинг сонли-аналитик усуллари ва математик моделини ишлаб чиқиш;

мураккаб конфигурацияли магнитоэластик пластина ва қобиқларнинг асосий чегаравий шартларини қониқтирувчи ечимлар мажмуаси ва тузилмасини R-функция усули ёрдамида шакллантириш;

мураккаб конструкция шаклдаги юпқа пластинка ва қобиқларнинг магнитоэластиклигини ифодаловчи тенгламалар тизимини ечишнинг фазовий ўзгарувчиларга нисбатан дискретлаш ва юпқа жисмларнинг магнитоэластиклик даражаси дискрет моделини ишлаб чиқиш;

мураккаб шаклдаги юпқа пластина ва қобиқларнинг магнитоэластиклик синфига боғлиқлик масалаларини вектор-матрицали услубларга асосланиб ечиш алгоритмлари ва юпқа жисмларнинг магнитоэластикликлик даражасини ҳисоблашнинг дастурий воситалари мажмуини ишлаб чиқиш;

R-функция усулини амалда қўллаш натижасида эришилган ҳисоблаш натижаларининг тўғрилиги ва ишончлилигини, юпқа пластина ва қобиқнинг магнитоэластиклик даражасини ифодаловчи математик моделларнинг адекватлигини таъминлаш;

мураккаб конструкция шаклдаги юпқа пластина ва қобиқларнинг деформацион ҳолатига электромагнит майдонининг таъсирини аниқлашнинг ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш ва юпқа жисмларнинг магнитоэластиклигини таъминлашга боғлиқ статик ва динамик масалаларни ечишнинг такомиллашган R-функция усулини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти мураккаб конструкцияли юпқа электр ўтказувчан жисмларнинг (пластина ва қобиқларнинг) магнитоэластиклик даражасини таъминлаш ташкил қилади.

Тадқиқотнинг предметини мураккаб конструкция шаклдаги юпқа электрўтказувчан жисмларнинг деформацион ҳолатига электромагнит майдоннинг таъсирини R-функция усули ёрдамида ифодаловчи математик моделлар, сонли-аналитик усуллар ва алгоритмик-дастурий воситалар мажмуи ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида математик ва сонли моделлаштириш, тизимли таҳлил, электродинамика назарияси, вариацион ҳисоблаш математикаси, алгоритмлаштириш, модулли ва тузилмали дастурлаш технологиялари, ҳамда ҳисоблаш экспериментлари ўтказиш усуллари қўлланган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги куйидагилардан иборат:

эластикликнинг чизиклилики назарияси ва Лоренц электромагнит кучини ҳамда Гамильтон-Остроградский умумлашган вариацион ҳисоблаш усулини инobatга олган юпқа электрўтказувчан жисмларга электромагнит майдоннинг таъсири жараёнини математик модели ишлаб чиқилган;

R-функция ва Бубнов-Галеркин вариацион усулларини биргаликда қўллаган ҳолда мураккаб конструкцияларнинг конфигурацияли юпқа электрўтказувчан жисмларга (пластина ва қобик) электромагнит майдоннинг таъсирини бошланғич-чегаравий шартларда изоҳловчи хусусий ҳосилаларни дифференциал тенглама тизимини ечишнинг сонли-аналитик усули ва алгоритми ишлаб чиқилган;

мураккаб конструкцияларнинг конфигурацияли (ғовакли) магнитоэластик пластина ва қобикларнинг қаттиқ маҳкамланган, шарнир-таянган чегаравий шартларни қониқтурувчи ечимлар мажмуаси ва тузилмаси ишлаб чиқилган;

мураккаб конструкцияларнинг шаклдаги юпқа пластина ва қобикларнинг магнитоэластиклик синфига мансуб масалаларни ечиш алгоритмлари ва юпқа жисмларнинг магнитоэластиклик даражасини ҳисоблашнинг дастурий воситалари мажмуи ишлаб чиқилган;

сонли ечимларни аниқ аналитик ечимлар билан таққослаш ва ечимлар тузилмасининг координат функциялар сонига нисбатан ўтказилган таҳлил яқинлашишга ва юпқа электрўтказувчан жисмларнинг магнитоэластиклигига эришилганлиги асосланган;

мураккаб конструкцияларнинг шакли юпқа электрўтказувчан жисмларнинг электромагнит майдоннинг статик ва динамик таъсири даражасини ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси куйидагилардан иборат:

электрон техника ишлаш сифатини ошириш имкониятини ҳисобга олувчи мураккаб геометрик конструкцияларнинг конфигурацияга эга бўлган юпқа электрўтказувчан жисмларга электромагнит майдоннинг таъсири даражасини аниқловчи юпқа пластина ва қобикнинг магнитоэластиклик математик моделлари ишлаб чиқилган;

мураккаб конструкцияларнинг шакли юпқа пластина ва қобик магнитоэластиклик амалий масалаларини R-функция конструктив усули асосида ечишнинг компьютерда турли вариантларида ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш имконини берувчи сонли-аналитик усул ва дастурий-алгоритмик воситалари ишлаб чиқилган;

ишлаб чиқилган магнитоэластик пластина ва қобикнинг кучланиш-деформацияланиш ҳолати жараёнини математик моделлаштириш усуллари ёрдамида мураккаб геометрик конструкцияга эга юпқа электрўтказувчан жисмларга электромагнит майдон таъсири 10-12% ташкил этишлиги, айрим ҳолларда ундан ҳам ортиқ бўлишлиги амалий баҳоланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги услубий жиҳатдан масаланинг математик қўйилиши ва уни ечиш учун қўлланилган Гамильтон-Остроградский вариацион усулларининг қатъийлиги, юпқа жисмларнинг магнитоэластиклик масаласининг коррект

қўйилиши, масалани ечишда асосланган R-функция ва Бубнов-Галеркин усулларида фойдаланиш, ҳисоблаш алгоритмининг яқинлашишини тадқиқ қилиш, шунингдек аниқ аналитик ечим билан таҳлилий ечимни таққосий солиштириш орқали олинган натижаларнинг мувофиқлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти электромагнит майдонларнинг юпқа электр ўтказувчан жисмларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларини R-функция усулида тадқиқ этишнинг универсал алгоритмик усуллари, математик моделлаштириш методологиясини ривожлантириш ва ишлаб чиқилган R-функция назарияси ва вариацион усуллари биргаликда қўллаган ҳолда сонли-аналитик усул ва ҳисоблаш алгоритмларини яратиш, шунингдек мураккаб конструкцион конфигурацияли юпқа пластина ва қобикларнинг магнитоэластиклигига боғлиқ масалаларни ечиш жараёнларини автомалаштириш имконини берувчи алгоритмик-дастурий воситаларни яратиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти юпқа электр ўтказувчан жисмлар, хусусан электромагнит майдонда жойлашган мураккаб конфигурацияли қобик ва пластиналар ташкил қилувчи конструкцияларни лойиҳадан олдинги ҳисоб китобларини, ҳамда магнитоэластик датчикларнинг ўрни автомобилларнинг хавфсизлик тизимини меърий ҳужжатлар талабига мослигини, транспорт воситасини кўчиш хавфини олдини олиш учун яратилган электрон бошқарувининг турғунлигини, масалан рулнинг буриш бурчаги қиммат датчикларга нисбатан, самарадор ва сифатли амалга оширишга хизмат қилади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Электромагнит майдонларнинг юпқа электр ўтказувчан жисмларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларини R-функция усулида математик моделлаштириш электромагнит ва деформацион майдонларнинг ўзаро таъсирига оид масалалар синфини ечишни автоматлаштиришнинг дастурий воситалар комплекси, R-функция конструктив усули ва Бубнов-Галеркин вариацион усули асосида тузилган ҳисоблаш алгоритмлари «Ўзбекхиммаш заводи» ҳамда «Алгоритм-Инжиниринг ИТИ»да қўлланилди (Ўзбекистон Республикаси Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2015 йил 22 июндаги № 24-8/2475-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқотлар натижалари электромагнит майдонларнинг юпқа электр ўтказувчан жисмларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларини R-функция усули ва математик моделлаштириш алгоритмлари ёрдамида мураккаб геометрик конфигурацияга эга юпқа электр ўтказувчан жисмларга электромагнит майдон таъсирини аниқлаш жараёнини автоматлаштириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертациянинг назарий ва амалий жиҳатлари қуйидаги халқаро ва республика конференция ва семинарларда муҳокама қилинган: «Математик физика ва ахборот технологияларининг замонавий муаммолари» (Тошкент, 2005), «Механика-

нинг замонавий муаммолари ва истикболи» (Тошкент, 2006), «ICI 2006» (Тошкент, 2006), «Актуальные проблемы прикладной математики и механики» (Харьков, 2006), «Актуальные проблемы механики сплошной среды и прочности конструкций» (Днепропетровск, 2007), «Современные проблемы математического моделирования и вычислительных технологий» (Красноярск, 2008), «Новые математические модели в механике сплошных сред: построение и изучение» (Новосибирск, 2009), DSMSI-2009 (Киев, 2009), «Распространение упругопластических волн» (Бишкек, 2009), «Механиканинг замонавий муаммолари» (Тошкент, 2009), «XIII международная научная конференция памяти академика М. Кравчука» (Киев, 2010), AICT2010 (Ташкент, 2010), ND-KhPI (Севастополь, 2013), «KHU-TUIT International Conference for ICT & Knowledge Economy» (Ташкент, 2014), «International scientific and practical conference» (Dubai, 2015); «Современное состояние и перспективы развития информационных технологий» (Тошкент, 2011), «Информационные технологии и проблемы телекоммуникаций» (Тошкент 2013).

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 52 та илмий иши чоп этилган, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 13 та мақола, жумладан, 9 таси республика ва 4 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация тузилиши кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертациянинг ҳажми 182 бетни ташкил этган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «Электр ўтказувчан юпқа жисмларнинг деформацион ҳолатига электромагнит майдонларнинг таъсирини таҳлили» деб номланган биринчи бобида электромагнит майдонларнинг электрўтказувчан юпқа жисмларга бўлган таъсири таҳлил қилинган, электрўтказувчан юпқа жисмларга электромагнит майдонларнинг таъсирини аниқлаш замонавий усуллари ва ривожланиш тенденциялари ўрганилган ҳамда мураккаб шаклга эга электрўтказувчан юпқа жисмларга электромагнит кучлар таъсирини математик моделлаштириш масаласи R -функция усули ёрдамида формаллаштирилган.

Магнитоэластиклик соҳасида илк илмий изланиш Л.Кнопфф ишида келтирилган бўлиб, соддалаштирилган моделдан фойдаланиб, магнитэластик таъсирлар тўлқинларни Ер магнит майдонида тарқалишига кам таъсир этишини аниқлаган.

Юпқа жисмлар магнитоэластиги ривож учун Польша олимларининг илмий ишлари муҳим бўлган. Улар электромагнит майдон билан эластик жисмлар ҳамда пластик деформацияланган жисмлар билан ўзаро таъсирга оид кўпгина масалаларининг ечимини топган. Жумладан, С.Калисский идеал ўтказувчан пластинкалар ва магнитоэластик стерженларда магнит майдони тебранишлари устида тадқиқотлар ўтказган. Вакуумда Максвелл ва пластинка ҳаракатланиш тенгламаларини биргаликда кўриб чиқилганда таркибида келиб чиқиши электромагнит ҳодисаси билан боғлиқ бўлган ҳадлар пластинка кўндаланг тебранишлар тенгламасида ҳосил бўлади. Мазкур тенгламани ечиш орқали пластинка механик параметрлари ва пластинка жисмидаги ҳамда пластинка тебранадиган муҳитнинг электромагнит майдон хусусиятлари аниқланади. Чексиз пластинканинг даврий мажбурий тебранишлари тўғрисидаги масала кўриб чиқилган. Бундан ташқари, магнит майдонидаги идеал ўтказувчан пластинканинг магнитоэластик ясси резонансли тебранишлари масаласини кўриб чиқиб, унда пластинка ўзини ўраб турган муҳитга электромагнит тўлқинлар тарқалиши туфайли пластинка тебранишлар амплитудаси чекланган бўлиб қолиши аниқланган.

Чет эл олимларнинг юпқа эластик ясси цилиндрик панелнинг статик ва динамик турғунлигига магнит майдоннинг таъсирини ўрганиб чиқишган, бунда ташкил этувчига параллел йўналтирилган, кўзғатилмаган тезликда юмшоқ ўтказувчи сиқилган газ ташқи томонидан таъсир этувчи ва ташкил этувчига мос йўналган деб қаралган. Масала геометрик ночизиқ кўйилишида

Бубнов-Галеркин усули ёрдамида ечилган. Магнит майдони кучланишининг оширилиши пастки кескин кучланишнинг камайишига олиб келади, аммо флаттер кескин тезлигининг сезиларли даражада ошишига олиб келади.

Чет эл олимларнинг ишларида электромагнит майдоннинг электр ўтказувчан эластик муҳитларда тўлқинлар тарзида таркалиши тадқиқ қилинган. Барқарорлашмаган ва ҳаракатланувчи магнитоэластик тўлқинлар таркалиши ҳамда магнитоакустик тўлқинлар ёйилишининг янги масалаларини берилган ечимлар таҳлилидан боғланган магнитоэластик ўзаро муносабатлар эффектлар таъсирининг сифат ва сон жиҳатдан баҳолари олинган. Муҳит электр ўтказувчанлиги ва ташқи магнит майдон кучланишининг оширилиши ёйилган майдонлар интенсивлигини пасайтиради ва йўналиш диаграммаларида нуллар ва экстремумлар жойлашишини ўзгартиради. Бундан ташқари, бир хил бўлмаган анизотроп плазмада электромагнит тўлқинлар ёйилиши тесқари масаласининг ечими қурилган ва ечим ягоналиги исботланган. Магнит майдони ва чегаравий қатламнинг флаттерли тебранишларга бўлган таъсири ҳам кўриб чиқилган. Паст ўтказувчан муҳит билан ўралган диэлектрик пластина учун математик масала қўйилиши кўриб чиқилган, турғунлик тенгламаси чиқарилган ва сонли таҳлил бажарилган. Турғунликка магнит майдоннинг барқарорлаштирувчи ҳамда барқарорсизлаштирувчи таъсирга эга параметрларининг турли қийматлари аниқланган. Реал магнит майдонлар флаттернинг критик тезликларига сезиларли даражада таъсир этиши мумкинлиги аниқланган. Ҳамда атрофлига қаттиқ таъсирга эга цилиндр масалалари ечимида ва қобиклар геометрик ночизикли дифференциал тенгламаларда асосланган бир чизикли бўлмаган флаттер тебранишлар ҳам кўриб чиқилган. Бубнов усулида (иккиҳадли аппроксимация) квадратли цилиндрли панел статик ва динамик турғунлиги тадқиқот қилинган. Критик кучланишларга магнитогидродинамик эффектлар таъсири баҳоланган.

Нормал электромагнитоэластик элементга нисбатан пластинка ўрта юзасида ўз узунлигини ўзгартириб, деформацияланиш бўлиш мумкин эканлигини украиналик олимлар ишларида кўрсатишган. Ундаги ҳар бир деформацион ҳолат эркин электр қувватини қайта тақсимланишига олиб келади. Шу билан бирга электр зарядлар кучланиши энг юқори қисмларда тўпланади. Нормал элемент узунлиги ўзгаришининг ҳисобига пластинка электр потенциали ўзгаришига сезиларли даражада таъсир этади.

Пластина ёки қобик материали идеал ўтказувчанликка эга ёки пластина чексиз бўлса электрўтказувчанлик чекли бўлади. Умумий ҳолда пластина ёки қобик чекли ўлчовларга эга бўлса, унинг материали чекли ўтказувчан бўлган ҳолатда берилган масаланинг ечими қийинчиликларга олиб келади. Таниқли арман олимларининг магнитоэластиклик соҳасидаги тадқиқотларида умумий эластиклик назарияси ва электродинамика уч ўлчамли тенгламаларни асимптотик интеграллаш орқали, чекли ўтказувчанликли юпка жисмлар учун магнитоэластиклик гипотезаси шакллантирилган.

Ташқи магнит майдонида жойлашган электрўтказувчан изотроп пластинка тебраниш масаласи пластинка ички соҳаси учун магнитоэластик

дифференциал тенгламалар ва ташқи соҳасида электродинамика тенгламалар ситемаси умумий ечимига боғлиқ. Таклиф қилинган усул магнит майдонлар мавжудлигида чекли ўтказувчан материалдан ясалган чекли ўлчамли пластиналар магнитоэластиклигининг турли масалаларини ечиш учун қўлланилади. Кейинги ишларда қобик ва пластиналар турдаги юпка жисмлар магнитоэластиклигининг асосий гоёлари муҳокама қилинади. Назариянинг умумий ҳамда амалий нуқтаи назардан қизиқиш ўйғотадиган кўпгина масалалари ечимлари кўриб чиқилган. Хусусан, тебранишлар ва турли электрўтказувчанликка эга суюқлик ёки газ билан ўралган изотроп ва анизотроп қобиклар ва пластиналарда флаттер масалалари ўрганилган, ток ўтказувчи пластиналар ва қобиклар турғунлиги ва тебранишлари масалалари тадқиқ қилинган.

Магнитоэластикликка доир баъзи хусусий масалаларининг аниқ аналитик ечимлари натижалари таҳлил қилинган ҳамда қобиклар ва пластиналар ҳолати магнитоэластиклиги уч ўлчамли тенгламаларининг умумий асимптотик ечимлари асосида юпка жисмлар магнитоэластиклик гипотезаси шакллантирилган. Мазкур гипотеза юпка қобиклар ва пластиналар магнитоэластиклиги умумий назариясини яратишга ҳамда кўпгина амалий масалаларининг самарали ечиш йўллари топишга имкон берди.

Бундан ташқари баъзи масалаларнинг аниқ ечимлари келтириладики, улар таклиф қилинган амалий назариянинг баҳолалишида ишлатилади.

Ўзбекистон ва Россия, Украина олимларининг бир қатор ишларида ташқи магнит майдонда эластик тизимлар турғунлиги ва тебранишлари ўрганилган. Ташқи магнит майдон таъсирида тўғри тўртбурчак пластиналар, стерженлар ва айлана цилиндрик қобикларнинг кичик тебранишлари частотаси аниқланган, даврий ҳаракатлар мавжудлигини таъминловчи магнит майдонининг критик қийматлари топилган. Вақти-вақти билан ўзгариб турувчи магнит майдонида пластиналар ва айлана цилиндрнинг параметрик резонанси кўриб чиқилган. Пластина ва унинг ўрта сирти чўзилиши билан боғлиқ мембраналарнинг ночик масаласи ўз ечимини топди. Магнит майдонда айлана цилиндрик қобик магнитоэластиклик тенгламалари ва цилиндр ва унинг яссилигидаги айланадиган эластик халқа унинг инерция кўчма ва кориолис кучлари ва электромагнит кучлардан тақсимланган моментларни ҳисобга олган ҳолда эластик тебранишлар кўриб чиқилган. Халқа ва цилиндрда деформация туфайли келиб чиқадиган гидромагнит эффекти аниқланган. Гироскоп билан боғлиқ эластик жисм ҳаракатлиниши ўрганилган. Охирларида тақсимланган массага ва гироскопга эга эластик занжирли тизим айланма тебранишлари ҳамда гироскопик кучлар мавжудлигида эркинлик чексиз сонли даражаларига эга тизим сифатида электромеханик тизим турғунлиги, гироскопик тизим элементи сифатида ташқи магнит майдонда эластик стержен (вал) айланма тебранишлари ҳам кўриб чиқилган. Бундан ташқари пьезоэлектриклар тадқиқот қилинган, пьезокамерада қалинлиги бўйича кутбланиш юза тўлқинлари мавжудлиги ва

тарқалиши масалалари, пьезокерамик дисклар радиал-кўндаланг боғланган тебранишлари кўриб чиқилган.

Юпқа пластиналар ва қобиклар магнитоэластиклиги, электроэластиклиги ва электромагнитоэластиклиги соҳасидаги тадқиқотлар ҳамда охириги 15-20 йилда уларни ечиш усуллари тахлили шуни кўрсатадики, юпка электрўтказувчан жисмларга электромагнит майдонлар таъсирини математик моделлаштириш усуллари тадқиқоти ҳалигача ўз ечимини топмаган, ва бу борада бўлган муаммо муҳим илмий-техник аҳамиятга эга.

Диссертациянинг «Электр ўтказувчан юпка жисмларнинг деформацион ҳолатига электромагнит майдонларнинг таъсири жараёнларини математик моделлаштириш» деб номланган иккинчи бобида юпка электр ўтказувчан жисмларга (пластина ва қобиклар) электромагнит майдонларининг таъсир этиш жараёнларини математик моделлаштириш тамойиллари ва математик моделларини ишлаб чиқишга бағишланган.

Бу ерда юпка пластиналар ва қобиклар эластиклик назариясининг асосий тенгламалари Гамильтон-Остроградский вариацион тамойилига асосан келтириб чиқарилади. Муайян моделлар қурилишида Коши геометрик муносабатлари ва Гук қонун тескари шаклида, физик муносабатлар ҳамда кўчишни ўзгартиришлар қонунини қўлланилади. Тенглама чиқаришида тўғри бурчакли координаталар тизими ишлатилади. Гамильтон-Остроградский вариацион тамойили куйидаги кўринишда ёзилади:

$$\delta \int (T - \Pi + A) dt = 0. \quad (1)$$

бу ерда: T – кинетик ва Π – потенциал энергиялар; A – ташқи кучлар иши.

Қобиклар (пластиналар) назарияси геометрик гипотезага асосланган, унга кўра ўрта юзасига нормал қобикнинг тўғри чизиқли элементи деформациядан кейин тўғри чизиқли, ушбу юзасига нисбатан унинг ҳолатида нормал ва ўз узунлигини сақлаб қолади. Мазкур гипотезада (Кирхгоф-Ляв) қобик деформацияси кўчиш деформациясиз ва нормал кесмалар юзаларида қобик қалинлиги бўйича чўзилиш деформациясиз амалга ошиши мумкин.

Қобиклар техник назариясида соддалаштирилган тенгламалар энг кўп тарқалган, яъни баъзи қўшимча имкониятларга асосланган Муштари-Донелла-Власов қобиклар назарияси тенгламаларига асосланади. Ясси қобиклар деб қобик ўрта юзасига хос ўлчамларига нисбатан сезилмас қаварикларга эга қобиклар тушунилади. Жумладан, В.З. Власов монографиясида ясси қобиклар деганда планида тўғри бурчак шаклига эга, қавариклиги нормал ўқи бўйлаб туғри бурчакнинг энг кичик томонининг 1/5 қисмига эга бўлган қобиклар тушунилади. Мазкур қобиклар категориясига бироз эгилган пластиналарни ҳам киритишади. Ясси қобиклар учун ўрта текислигининг геометрияси Евклид геометриясига бўйсиниши тушунилади. Мувозанат тенгламалар энг оддий шакли декарт координаталарида кўрсатилган. Аналитик тарзда Кирхгоф-Ляв гипотезасини куйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$u_1 = (1 + k_1 z)u - z \frac{\partial w}{\partial x},$$

$$u_2 = (1 + k_2 z)v - z \frac{\partial w}{\partial y},$$

$$u_3 = w. \quad (2)$$

Бунда u_1, u_2, u_3 – қобик (пластина) ихтиёрий нуктасида кўчишлар (эгилиш); u, v, w – қобик (пластина) ўрта юзасининг кўчишлари (эгилиши); k_1, k_2 – ўрта юзанинг асосий эгриликлари; $k_1 = 1/R_1, k_2 = 1/R_2$, бу ерда R_1, R_2 – эгриликнинг асосий радиуслари. Пластиналар ҳолатида $k_1 = k_2 = 0$.

Келиб чиқиши электромагнит бўлган кучларни ҳисобга олган ҳолда ишлар вариацияси қуйидаги кўринишда белгиланади:

$$\int \delta A dt = \iiint_V [(X + \rho K_x) \delta u_1 + (Y + \rho K_y) \delta u_2 + (Z + \rho K_z) \delta u_3] dV dt +$$

$$+ \iint_{\Gamma} [(q_x + T_{xx}) \delta u_1 + (q_y + T_{yy}) \delta u_2 + (q_z + T_{zz}) \delta u_3] \Big|_z dx dy dt +$$

$$+ \iint_{\Gamma} [(P_x + T_{xx}) \delta u_1 + (P_y + T_{yy}) \delta u_2 + (P_z + T_{zz}) \delta u_3] \Big|_x dz dy dt +$$

$$+ \iint_{\Gamma} [(F_x + T_{xx}) \delta u_1 + (F_y + T_{yy}) \delta u_2 + (F_z + T_{zz}) \delta u_3] \Big|_y dz dx dt, \quad (3)$$

Бунда $X, Y, Z, \rho K_x, \rho K_y, \rho K_z$ – ҳажм кучларининг ифодалари; $q_x = q_x^+ + q_x^-$, $q_y = q_y^+ + q_y^-$, $q_z = q_z^+ + q_z^-$, $T_{xx} = T_{xx}^+ + T_{xx}^-$, $T_{yy} = T_{yy}^+ + T_{yy}^-$, $T_{zz} = T_{zz}^+ + T_{zz}^-$ – юза кучларининг ифодалари; $P_x, P_y, P_z, T_{xx}, T_{yy}, T_{zz}, F_x, F_y, F_z, T_{yx}, T_{xy}, T_{yz}$ – контурли кучлар ифодалари.

Ташқи кучлар (3) ишининг вариацияларида мос равишда (2) кўчишларни кўямиз, мос аналитик амалларни, жумладан интеграллаш, бўлаклар интеграллаш, ўхшаш ҳадларни келтириш ва ифодаларни алмаштиришларни бажариб, қуйидагиларни оламиз:

$$\int \delta A dt = \iiint_V [(N_x + R_x + k_1 M_x + k_1 M_{Rx} + q_x + T_{xx} + k_1 q_x (\frac{h}{2}) + k_1 q_x (-\frac{h}{2}) +$$

$$+ k_1 T_{xx} (\frac{h}{2}) + k_1 T_{xx} (-\frac{h}{2})) \delta u +$$

$$+ (N_y + R_y + k_2 M_y + k_2 M_{Ry} + q_y + T_{yy} + k_2 q_y (\frac{h}{2}) + k_2 q_y (-\frac{h}{2}) + k_2 T_{yy} (\frac{h}{2}) + k_2 T_{yy} (-\frac{h}{2})) \delta v +$$

$$(N_z + R_z + q_z + T_{zz} - \frac{\partial}{\partial x} M_x - \frac{\partial}{\partial x} M_{Rx} - \frac{\partial}{\partial y} M_y - \frac{\partial}{\partial y} M_{Ry} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} (q_x (\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial x} (q_x (-\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} (\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} (-\frac{h}{2})) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} (q_y (\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial y} (q_y (-\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} (\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} (-\frac{h}{2})) \delta w] dx dy dt +$$

$$+ \iint_{\Gamma} [(N_{Rx} + N_{Tx} + k_1 M_{Rx} + k_1 M_{Tx}) \delta u + (N_{Ry} + N_{Ty} + k_2 M_{Ry} + k_2 M_{Ty}) \delta v +$$

$$\begin{aligned}
& \left. \left(N_{P_x} + N_{T_{xz}} + \frac{\partial}{\partial y} M_{P_x} + \frac{\partial}{\partial y} M_{T_{xz}} - q_x \left(\frac{h}{2} \right) - q_x \left(-\frac{h}{2} \right) - T_{xz} \left(\frac{h}{2} \right) - T_{xz} \left(-\frac{h}{2} \right) - \right. \right. \\
& \quad \left. \left. - q_y \left(\frac{h}{2} \right) - q_y \left(\frac{h}{2} \right) - T_{xy} \left(\frac{h}{2} \right) - T_{xy} \left(-\frac{h}{2} \right) \right) \delta v \right] \Big|_x dy dt + \\
& + \int \int_x \left[(N_{P_x} + N_{T_{yx}} + k_2 M_{P_x} + k_2 M_{T_{yx}}) \delta u + (N_{P_y} + N_{T_{yy}} + k_2 M_{P_y} + k_2 M_{T_{yy}}) \delta v + \right. \\
& \quad \left. (N_{P_x} + N_{T_{yx}} + \frac{\partial}{\partial x} M_{P_x} + \frac{\partial}{\partial x} M_{T_{yx}} - q_x \left(\frac{h}{2} \right) - q_x \left(-\frac{h}{2} \right) - T_{yx} \left(\frac{h}{2} \right) - T_{yx} \left(-\frac{h}{2} \right) - \right. \\
& \quad \left. - q_x \left(\frac{h}{2} \right) - q_x \left(-\frac{h}{2} \right) - T_{xz} \left(\frac{h}{2} \right) - T_{xz} \left(-\frac{h}{2} \right) \right) \delta v \right] \Big|_y dx dt - \\
& - \int \left[M_{P_x} + M_{T_{xz}} + M_{P_y} + M_{T_{yx}} + M_{P_x} + M_{T_{yx}} + M_{P_y} + M_{T_{yy}} \right] \delta w \Big|_x \Big|_y dt.
\end{aligned}$$

Бунда

$$\begin{aligned}
N_x &= \int_x X dz, \quad N_y = \int_y Y dz, \quad Q_x = \int_x Z dz, \quad M_x = \int_x z X dz, \quad M_y = \int_y z Y dz, \\
R_x &= \int_x \rho K_x dz, \quad R_y = \int_y \rho K_y dz, \quad R_z = \int_x \rho K_z dz, \quad M_{R_x} = \int_x z \rho K_x dz, \quad M_{R_y} = \int_y z \rho K_y dz, \\
N_{P_x} &= \int_x P_x dz, \quad N_{P_y} = \int_y P_y dz, \quad Q_{P_x} = \int_x P_x dz, \quad M_{P_x} = \int_x z P_x dz, \quad M_{P_y} = \int_y P_y dz, \\
N_{T_{xz}} &= \int_x T_{xz} dz, \quad N_{T_{yx}} = \int_y T_{yx} dz, \quad Q_{T_{xz}} = \int_x T_{xz} dz, \\
M_{T_{xz}} &= \int_x z T_{xz} dz, \quad M_{T_{yx}} = \int_y z T_{yx} dz, \quad M_{T_{xz}} = \int_x z T_{xz} dz, \\
N_{F_x} &= \int_x F_x dz, \quad N_{F_y} = \int_y F_y dz, \quad Q_{F_x} = \int_x F_x dz, \quad M_{F_x} = \int_x z F_x dz, \quad M_{F_y} = \int_y z F_y dz, \\
N_{T_{yx}} &= \int_x T_{yx} dz, \quad N_{T_{yy}} = \int_y T_{yy} dz, \quad Q_{T_{yx}} = \int_x T_{yx} dz, \\
M_{T_{yx}} &= \int_x z T_{yx} dz, \quad M_{T_{yy}} = \int_y z T_{yy} dz, \quad M_{T_{yx}} = \int_x z T_{yx} dz, \\
M_{q_x}^+ &= q_x \left(\frac{h}{2} \right), \quad M_{q_x}^- = q_x \left(-\frac{h}{2} \right), \quad M_{q_y}^+ = q_y \left(\frac{h}{2} \right), \quad M_{q_y}^- = q_y \left(-\frac{h}{2} \right), \\
M_{T_{xz}}^+ &= T_{xz} \left(\frac{h}{2} \right), \quad M_{T_{xz}}^- = T_{xz} \left(-\frac{h}{2} \right), \quad M_{T_{yx}}^+ = T_{yx} \left(\frac{h}{2} \right), \quad M_{T_{yx}}^- = T_{yx} \left(-\frac{h}{2} \right).
\end{aligned}$$

Кейин кинетик, потенциал энергия ва ташқи кучлар иши олинган ифодаларни Гамильтон-Остроградский вариацион тамойили (1) га киритамиз. Олинган вариацион тенглама ҳар қандай ҳамм v қийматида ўринли. Шунинг учун v соҳасининг ихтиёрий бўлишига асосан қобқ ҳаракат тенгламаларини ва табиий бошланғич ва чегаравий шартларини оламиз:

$$\begin{aligned}
-\rho h \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{\partial N_{12}}{\partial y} + (k_1 - k_2) \frac{\partial M_{12}}{\partial y} + N_x + R_x + q_x + T_{xz} &= 0, \\
-\rho h \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \frac{\partial N_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_{22}}{\partial y} - (k_1 - k_2) \frac{\partial M_{12}}{\partial x} + N_y + R_y + q_y + T_{yy} &= 0,
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
& -\rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 M_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{22}}{\partial y^2} + k_1 N_{11} + k_2 N_{22} - k_1^2 M_{11} - k_2^2 M_{22} + Q_x + R_x - \frac{\partial}{\partial x} (M_x + M_{rx}) - \\
& - \frac{\partial}{\partial y} (M_y + M_{ry}) + q_x + T_{xx} + \frac{\partial}{\partial x} (M_{qx}^+ + M_{qx}^- + M_{Tx}^+ + M_{Tx}^-) + \frac{\partial}{\partial y} (M_{qy}^+ + M_{qy}^- + M_{Ty}^+ + M_{Ty}^-) = 0,
\end{aligned}$$

Бундаги тенгламанинг баъзи ҳадлари таъсири жуда кам бўлганлиги сабабли олиб ташланган.

Табиий чегаравий шартлар куйидагича:

$$\begin{aligned}
& (-N_{11} + N_{rx} + N_{Tx}) \delta U|_x = 0, (-N_{12} + N_{ry} + N_{Ty}) \delta V|_x = 0, \\
& \left(-\frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial t} - \frac{\partial M_{11}}{\partial x} - \frac{\partial M_{12}}{\partial y} + Q_{rx} + Q_{Tx} - M_{qx}^- - M_{qx}^+ - M_{Tx}^- - M_{Tx}^+ \right) \delta W|_x = 0, \\
& (M_{11} - M_{rx} - M_{Tx}) \delta \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_x = 0, (-M_{12} - M_{ry} - M_{Ty}) \delta \frac{\partial W}{\partial y} \Big|_x = 0, \quad (5) \\
& (-N_{12} + N_{rx} + N_{Tx}) \delta U|_y = 0, (-N_{22} + N_{ry} + N_{Ty}) \delta V|_y = 0, \\
& \left(-\frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial x} - \frac{\partial M_{12}}{\partial x} - \frac{\partial M_{22}}{\partial y} + Q_{rx} + Q_{Ty} - M_{qy}^- - M_{qy}^+ - M_{Ty}^- - M_{Ty}^+ \right) \delta W|_y = 0, \\
& (M_{12} - M_{rx} - M_{Ty}) \delta \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_y = 0, (M_{22} - M_{ry} - M_{Ty}) \delta \frac{\partial W}{\partial y} \Big|_y = 0.
\end{aligned}$$

Шундай қилиб, Кирхгоф-Ляв гипотезасини қўллаб Гамильтон-Остроградский вариацион тамойили асосида ясси қобикқа қўйилган чегаравий шартлар (5) ва ҳаракат тенгламаси (4) курилди.

Масаланинг бундай қўйилишида тўлик ҳажмли кучларга қўшиладиган келиб чиқиши электромагнит бўлган ҳажмий кучлар куйидаги кўринишда бўлади:

$$f = \rho \mathcal{K} = \frac{1}{4\pi} (\text{rot}(\text{rot}(\mathbf{U} \times \mathbf{H}))) \times \mathbf{H}, \quad (6)$$

Бунда $U(u_1, u_2, u_3)$ – кўчишлар вектори; $H(H_x, H_y, H_z)$ – магнит майдон кучланганлиги вектори.

Тўла юза ва контурли (чегаравий) кучларга Максвелл электродинамик кучланиш тензори қўшилади

$$T_{ik} = \frac{1}{4\pi} [H_i h_k + h_i H_k] - \frac{b_{ik}}{4\pi} \bar{h} \bar{H}, \quad T_{ik}^* = \frac{1}{4\pi} [H_i^* h_k^* + h_i^* H_k^*] - \frac{b_{ik}^*}{4\pi} \bar{h}^* \bar{H}^*, \quad (7)$$

где $b_{ik} = \begin{cases} 0, & i \neq k, \\ 1, & i = k. \end{cases}$

(6) ва (7) муносабатларни ҳисобга олган ҳолда (4) ва (5) тенгламалар юққа пластиналар ва қобиклар магнитоэластикнинг математик моделлари аниқланади.

Юққа мураккаб шаклдаги пластиналар ва қобиклар магнитоэластиклиги масалаларини алгоритмлаштириш кўриб чиқилган.

Диссертациянинг «Юққа жисмларнинг магнитоэластиклик чегаравий масалаларини R-функция ёрдамида ечиш усуллари» деб номланган учинчи бобида юққа жисмлар магнитоэластиклигининг чегаравий масалаларини R-функция назарияси ёрдамида ечиш усулларига бағишланган.

Кўйилган масалани ечиш учун юпка магнитоэластик пластиналар ва ясси қобиклар тебранишлари учун Бубнов-Галеркин вариацион усули қўлланилади. Маълумки, унда масалаларни ечиш жараёни қуйидаги босқичлардан иборат:

- белгиланган чегаравий шартларга мос келадиган координата функциялари кетма-кетлигини (ечимлар тузилмаларини) куриш;
- фазовий ўзгарувчиларига нисбатан дискретизация, дискрет тенгламалар, яъни дискрет моделларни куриш;
- дискрет тенгламаларни ечиш ва ечимлар тузилмаларининг номаълум компоненталарини топиш;
- номаълум функцияларни аниқлаш, бизнинг мисолимизда қобик ўрта сиртининг тангенциал ва нормал кўчишларини аниқлаш.

Дастлабки босқичда берилган чегаравий шартларга жавоб берадиган координата функциялари кетма-кетлигини куришда В.Л.Рвачев R-функциялар конструктив усули қўлланилган. Шунинг таъкидлаб ўтиш жоизки, R-функциялар конструктив усули (RFM) координата функциялари кетма-кетлигини қобик контурининг мураккаб конфигурациясида ва деярли ихтиёрий чегаравий шартларга жавоб берадиган ечимлар тузилмаси шаклида ифодаланади.

Умумий ҳолатда RFM усули ёрдамида яратилган ечимлар тузилмасини қуйидаги шаклда ифодалаш мумкин:

$$u = u(\omega, \Phi_1), \quad v = v(\omega, \Phi_2), \quad w = w(\omega, \Phi_3), \quad (8)$$

бу ерда

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^{N_1} c_i(t) \varphi_i(x, y), \quad \Phi_2 = \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} c_i(t) \phi_i(x, y), \quad \Phi_3 = \sum_{i=N_1+N_2+1}^{N_1+N_2+N_3} c_i(t) f_i(x, y).$$

У ҳолда изланаётган u , v ва w функцияларни қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$u = \sum_{i=1}^{N_1} c_i(t) u_i(\omega, x, y), \quad v = \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} c_i(t) v_i(\omega, x, y), \quad w = \sum_{i=N_1+N_2+1}^{N_1+N_2+N_3} c_i(t) w_i(\omega, x, y). \quad (9)$$

Бу ерда ω – қобик чегараларининг нормаллаштирилган тенгламаси; φ_i , ϕ_i ва f_i – функциялар маълум тўлик (базисли) тизимлари (Чебышев, тригонометрик полиномлар ва бошқалар); c_i – аниқлаш керак бўлган ечимлар номаълум коэффициентлари.

Тенгламаларга (8), (9) ечимлар тузилмасини қўйиб ва x ва y фазовий ўзгарувчилар бўйича дискретизация амали ўтказиб ечимлар тузилмаси номаълум коэффициентларни аниқлаш учун дискрет тенгламалар (дискрет модель) олинган.

Динамика ҳолатида дискрет тенгламалар оддий дифференциал тенгламалар тизими (ОДТТ) шаклида берилди

$$AC + BC = F \quad (10)$$

қуйидаги бошланғич шартлари билан

$$C|_{t=t_0} = C_0, \quad \dot{C}|_{t=t_0} = \dot{C}_0, \quad (11)$$

Бунда

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix},$$

$$A_1 = \iint_{\Omega} L_1 u, u, d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{1, N_1},$$

$$A_2 = \iint_{\Omega} L_2 v, v, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2},$$

$$A_3 = \iint_{\Omega} L_3 w, w, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3},$$

$$B_{11} = \iint_{\Omega} L_1 u, u, d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{1, N_1},$$

$$B_{12} = \iint_{\Omega} L_{12} v, u, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \quad j = \overline{1, N_1},$$

$$B_{13} = \iint_{\Omega} L_{13} w, u, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \quad j = \overline{1, N_1},$$

$$B_{21} = \iint_{\Omega} L_{21} u, v, d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2},$$

$$B_{22} = \iint_{\Omega} L_{22} v, v, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2},$$

$$B_{23} = \iint_{\Omega} L_{23} w, v, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2},$$

$$B_{31} = \iint_{\Omega} L_{31} u, w, d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3},$$

$$B_{32} = \iint_{\Omega} L_{32} v, w, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3},$$

$$B_{33} = \iint_{\Omega} L_{33} w, w, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3},$$

$$C_1 = \iint_{\Omega} q_1 w, d\Omega, \quad j = \overline{1, N_1},$$

$$C_2 = \iint_{\Omega} q_2 w, d\Omega, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2},$$

$$C_3 = \iint_{\Omega} q_3 w, d\Omega, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3},$$

унда L_x, L_y – тенгламаларнинг дифференциал операторлари.

Статика ҳолатида дискрет тенгламалар чизикли алгебраик тенгламалар тизими (ЧАТТ) шаклида берилади

$$BC = F, \quad (12)$$

Дискрет тенгламалар ечиш учун алгебра ва анализнинг сонли усуллари ишлатилади, жумладан (10)-(11) ОДТТни ечиш учун Ньюмарк усули, (12) ЧАТТни ечиш учун Гаусс усули ишлатилади. Шу билан бирга мос матрица компонентларини, ҳамда тенгламанинг ўнг томони вектори компонентларини ифодаловчи аниқ интегралларни ҳисоблашда икки қаррали Гаусс интеграллаш ва ҳисоблаш сонли усули қўлланилади. Номаълум функциялар аниқлаш – қобик ўрта сирти тангенциал ва нормал кўчишларни – тузилмавий формулалар бўйича амалга оширилади. Чегаравий шартлар учун ечимлар тузилмаси: қаттиқ маҳкамланиш чегаравий шarti

$$u = \omega \Phi_1, \quad v = \omega \Phi_2, \quad w = \omega^2 \Phi_3;$$

шарнир маҳкамланиш чегаравий шарт

$$u = \omega\Phi_1, v = \omega\Phi_2, w = \omega\Phi_3 - \omega^2(\Phi_3(D_2\omega + vT_2\omega) + 2D_1\Phi_3)/2; \text{ ва х.к..}$$

бу ерда D_1, D_2, T_2 – дифференциал операторлар.

Диссертациянинг «R-функция усулида пластина ва қобикларнинг магнитоэластиклигини ҳисоблаш дастурий комплекси» деб номланган тўртинчи бобида мураккаб шаклли юпқа пластина ва қобиклар ҳолатини R-функциялар усули ёрдамида ҳисоблаш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилган. Юпқа мураккаб шаклли пластиналар ва қобиклар магнитоэластиклиги масалаларини ечиш алгоритмларининг модулли таҳлили ва ишлаб чиқилган алгоритм асосида янги дастурий воситалар мажмуи (ДВМ) ишлаб чиқилган. ДВМ блоklar тузилмаси 1-расмда келтирилган.



1-расм. Дастурий воситалар мажмуининг (ДВМ) тузилмаси.

Янги дастурлар мажмуи мавжуд ДВМ асосида ишлаб чиқилган, унинг тузилмаси қуйидаги блоklarдан ташкил топган:

1. Типлар ва константалар модули.
2. R-амаллар ва қартеж амаллар учун модули.
3. Интеграл ости ифодаларни ҳисоблаш учун модули.

4. Соҳа геометрияси функциялари (ва уларнинг етарли тартибдаги хосилалари) учун модул.

5. Тузилмавий формулалар учун модул.

6. Интеграл вазили ва нуқталар генерация қилиш учун модул.

7. Дискрет тенглама элементларини шакллантириш учун модул.

8. Дискрет тенгламаларни ечиш учун модул.

9. Ҳисоблаш натижаларини расмийлаштириш учун модул.

10. Бошқарув дастури қисми.

Дастурлар мажмуи ҳар бир блоки процедуралар ва функциялар кўринишдаги бир неча модуллардан иборат. Мазкур модуллар қисм дастурлар блокларидан яратилган. Ушбу ДВМ Delphi тилида MS WINDOWS муҳитида амалга оширилган.

Ишлаб чиқарилган ДВМ мураккаб шаклдаги пластиналар ва қобиклар магнитоэластик чегаравий масалалар, хусусий хосилали дифференциал тенгламалар тизими (уларга туташ муҳитлар механикаси кўпгина масалалари мос келиши мумкин) учун ечимини автоматлаштиришга имкон беради.

Дастурий таъминотни ишлатиш бўйича йўриқнома ишлаб чиқилган.

Диссертациянинг «R-функция усулида юпқа пластина ва қобикларнинг магнитоэластиклик масалаларини ечишнинг ҳисоблаш тажрибалари» деб номланган бешинчи бобида юпқа пластиналар ва қобиклар магнитоэластиклиги масалаларини R-функциялар усули ёрдамида ечиш бўйича ҳисоблаш тажрибаларига бағишланган. Сонли ечим тўғрилигини асослаш учун чегаравий шартлари қаттиқ маҳкамланган ва эркин таянган ҳамда айлана ва квадрат шаклига эга магнитоэластик пластиналар учун статика масалалари кўриб чиқилган. Жадвалда олинган натижалар таққосланган. Жадвалда квадрат, айлана пластиналар мос чегаравий шартларда турли нуқталарда масаланинг R-функциялар сонли (W_R) ва аниқ (W_T) ечимлар қийматлари келтирилган. Бу ерда биз олган ҳисоблаш натижалари аниқ ечим натижаларидан кам фарқ қилади, бу эса етарли даражада аниқлик ва мураккаб шаклли пластиналар ҳисоблаш учун R-функциялар усули қўлланиш мумкинлигидан кафолат беради.

Жадвал. Аниқ ва сонли ечимлар қиссий таҳлили

(x,y)		Квад. Кат. махк.		Квад. шарн.махк.		Айл. қат.махк.	
X	Y	W_R	W_T	W_R	W_T	W_R	W_T
0.0	0.0	0.96787	1.0000	0.99745	1.00000	1.00002	1.00000
0.2	0.0	0.89655	0.9216	0.94895	0.95105	0.92160	0.92160
0.4	0.0	0.69533	0.7056	0.80787	0.80902	0.70561	0.70560
0.6	0.0	0.40978	0.4096	0.58741	0.58779	0.40960	0.40960
0.8	0.0	0.13136	0.1296	0.30845	0.30902	0.12961	0.12960

Диссертацияда магнит майдон $H(H_x, H_y, H_z)$ берилган кучланиш вектори мавжуд магнит майдонда жойлашган магнитоэластик пластина ўгилиш масаласи кўриб чиқилган. Мазкур пластина ҳолатини тафсирловчи ўлчовсиз координатлардаги тенгламаси (4) га кўра куйидаги кўринишга эга:

$$k_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + k_2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + k_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + k_4 \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + k_5 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + k_6 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k_7 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + k_8 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = q, \quad (13)$$

Бу ерда

$$k_1 = 1 + \frac{I(H_x^2 + H_z^2)}{4\pi D}; k_2 = -2 \frac{IjH_x H_y}{4\pi D}; k_3 = 2j^2 + \frac{I \cdot j^2 (H_x^2 + H_y^2 + 2H_z^2)}{4\pi D}; k_4 = -2 \frac{Ij^3 H_x H_y}{4\pi D};$$

$$k_5 = j^4 + \frac{Ij^4 (H_x^2 + H_z^2)}{4\pi D}; k_6 = -\frac{ha^2 (H_y^2 - H_x^2)}{4\pi D}; k_7 = -\frac{4hja^2 H_x H_y}{4\pi D}; k_8 = \frac{hj^2 a^2 (H_y^2 - H_x^2)}{4\pi D}.$$

Мисол тариқасида 7-расмда келтирилган иккида айлана шаклдаги кесимга эга тенг юкланган куч q таъсирида бўлган мис пластинани оламиз.

Ҳисоблашда қуйидаги механик ва геометрик параметрларни қабул қиламиз: $H_x = H_y = H_z = 10 \text{ кЭ}$, ($1 \text{ Э} = 1 \text{ кэ}^{1/2}/(\text{м}^{1/2} \text{сек})$); $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кэ/м}^3$ – пластина материалининг зичлиги; $h = 10^{-2} \text{ м}$ – пластина қалинлиги;

$q = \frac{a^4 Q_3}{Dh} = 1$ – пластинага таъсир этувчи куч; $E = 10^{11} \text{ Н/м}^2$ – эластиклик модули; $\nu = 0,3$ – Пуассон коэффиценти; $R = 1 \text{ м}$; $r = 0,2 \text{ м}$; $a = 0,5 \text{ м}$.

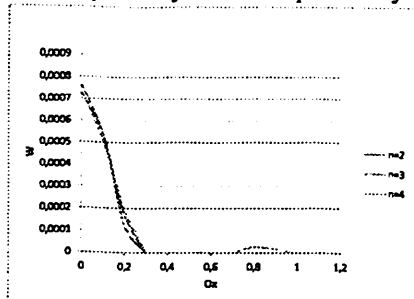
Бу ерда $w = F_1 \wedge (F_2 \wedge F_3)$. F_1 , F_2 и F_3 таянч соҳалар учун мантикий функциялар қуйидаги кўринишда тақдим этамиз

$$F_1 = R^2 - x^2 - y^2 \geq 0; F_2 = (x-a)^2 + y^2 - r^2 \geq 0; F_3 = (x+a)^2 + y^2 - r^2 \geq 0,$$

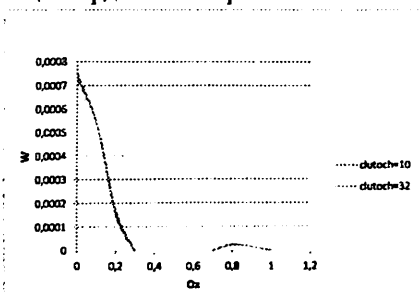
унда: R – айлана пластина радиуси, r – маркази $(a,0)$ и $(-a,0)$ нуқталарда бўлган пластинанинг айлана кесими радиуси.

Ечим тузилмасига кирувчи базис полиноми сифатида кўп ҳадли полиномни оламиз.

Қуйида 2-5 расмларда Ox и Oy кесмалар бўйича (nk) полином даражаси ва Гаусс тугунларига (*clutch*) нисбатан W эгилишнинг ўзгариши графиги келтирилган. 2 ва 3 расмларда Ox кесма бўйича эгилишнинг ўзгариши келтирилган, *clutch*=20 да nk 2 дан 4 гача ўзгаради, $nk=3$ бўлганда *clutch* эса 20 ва 32 бўлади. 4 и 5 расмларда Oy кесмаси бўйича мос равишда nk ва *clutch* худди шу қийматларга эга бўлган ҳолларда акс эттирилган.



2-расм. Ох ўқи бўйича эгилиш

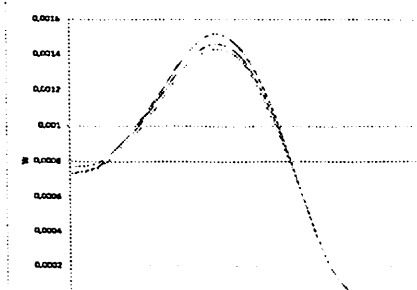


3-расм. Ох ўқи бўйича эгилиш

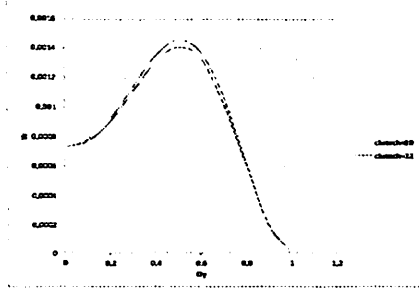
Мазкур 2-5 расмларда келтирилган графиклардан кўриниб турибдики, эгилиш Oy кесмада $x=0$, $y=0,5$ нуқтага яқинлашганда ўзининг максимал қийматига етади. $nk=3$ қийматида яқинлашиш яхши бўлганлиги бонс

қўйилган масалани тадқиқ қилиш учун етарли ҳисобланади. Шунини таъкидлаш лозимки, *clutch* ошиши билан яқинлашиш яхшиланади.

Шунга ўхшаш ҳисоб-киتابлар тўрт айланали кесимларган эга айлана пластина учун келтирилган. Таҷрибалар биринчи масаладагидек техник ва геометрик параметрларда ўтказилган.



4-расм. Оу ўқи бўйича эғвлиш



5-расм. Оу ўқи бўйича эғвлиш

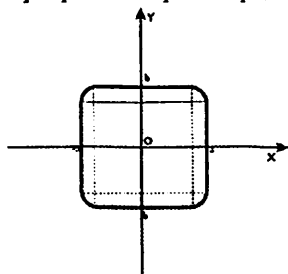
Бундан ташқари саккизбурчакли шаклига эга ва бутун контур бўйлаб қаттиқ маҳкамланган магнитоэластик пластина эғилиш масаласи кўрилган.

Унда $\omega = (F_1 \wedge F_2) \vee (F_3 \wedge F_4)$, бу ерда

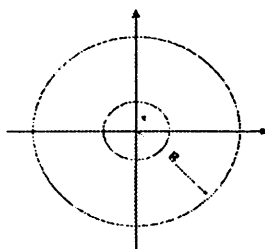
$$F_1 = a^2 - x^2 \geq 0; F_2 = a^2 - y^2 \geq 0; F_3 = b^2 - (x + y)^2 \geq 0; F_4 = b^2 - (x - y)^2 \geq 0.$$

Ҳисоблар $a = 1/\sqrt{2}$ ва $b = 1$ қийматларда ўтказилади.

Диссертацияда электромагнит кучларнинг, хусусан магнит майдони кучланишининг статик таъсири мураккаб шакли чегараси бутун контур бўйича шарнир маҳкамланган ҳолатда кўрилган. Ишда учлари айланасимон бурчакли тўртбурчакли юпқа пластина доимий магнит майдонида кўрилган бўлиб магнит майдон магнитостатика масаласини ечилиши орқали топилади, ҳамда турли чегаравий шартли ҳалқасимон пластина қаралади. Мос равишда пластина тасвирлари 6 ва 7 расмларда келтирилган.



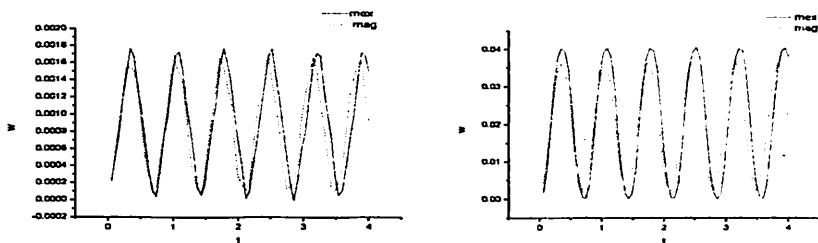
6-расм. Учлари айланасимон тўртбурчак



7-расм. Ҳалқасимон пластина

Қуйидаги 8 ва 9 расмларда чегарада бутун контури бўйича қаттиқ маҳкамланган мураккаб шаклга эга, яъни учлари айланасимон бурчакли тўртбурчак пластинанинг турли нуқталарида магнит майдони таъсиридаги (*mag*) ва магнит майдони бўлмаган (*tex*) ҳолатлари келтирилган.

Ҳисоблаш натижаларнинг таҳлили юққа электр ўтказувчан пластиналарга электромагнит майдонларнинг таъсири кўрсатилган.



8-расм. $(-0.9, 0)$ нуктада пластина тебраниши 9-расм. $(0, 0)$ нуктада пластина тебраниши

R-функция усули ёрдамида қурилган тузилмавий ечим кўринишида аралаш чегаравий шарлар қаноатлантирувчи координата функциялари кетма-кетлиги қуйидагича қурилади:

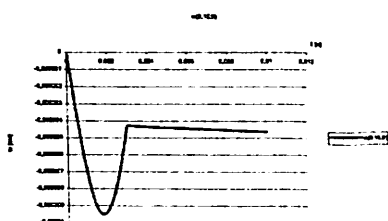
$$w = \omega_1^2 \Phi_1 + \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{2(\omega_1^2 + \omega_2^2)} * \left\{ -\frac{\omega_2}{3} [D_3^{(2)} + (2-\nu)D_1^{(2)}T_2^{(2)}] \times \right. \\ \left. \times (\omega_1^2 \Phi_1 - \omega_2^2 [D_2^2(\omega_1^2 \Phi_1) + \nu T_2^2(\omega_1^2 \Phi_1)] - D_2^2(\omega_1^2 \Phi_1) - \nu T_2^2(\omega_1^2 \Phi_1)) \right\}$$

бу ерда $\omega_1 = \frac{R^2 - x^2 - y^2}{2R}$, $\omega_2 = \frac{r^2 - x^2 - y^2}{2r}$, $\Phi_1 = \sum_{i,j=0}^n C_{ij} \chi_i(x) \chi_j(y)$; ω_1 – ташқи айлана чегараси функцияси; ω_2 – ички айлана чегараси функцияси; R, r – мос равишда ташқи ва ички айлана радиуслари.

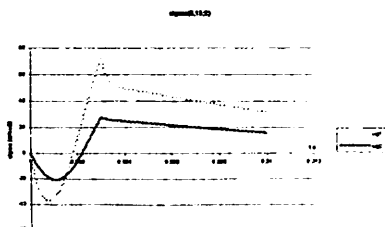
Параметрлар: $D = 5.3$ мм ($R=D/2$), $d = 1.9$ мм ($r=d/2$), $h = 0.6$ мм,

$\sigma = 910 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, $E = 89$ ГПа = $89 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, $\rho = 8.3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$, $G = 34$ ГПа = $34 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$,

$\nu = 0.3$, $q = 4400 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ ($q = 4400 \sin\left(\frac{\pi}{t_n}\right) \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$).



10-расм. $(0.15, 0)$ нуктадаги эгилишнинг диаграммаси



11-расм. $(0.15, 0)$ нуктадаги қучланишнинг диаграммаси

10 ва 11 расмларда мос равишда эгилиш ва қучланишнинг соҳага тегишли характерли нукталардаги натижалари келтирилган.

ХУЛОСА

«Электромагнит майдонларнинг юпка электр ўтказувчан жисмларнинг деформацион ҳолатига таъсир этиш жараёнларини R-функция усулида математик моделлаштириш» мавзусидаги докторлик диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижалари қуйидагилардан иборат:

1. Чизиқли эластиклик назарияси ва чизиқли электродинамиканинг геометрик ва физик муносибликлари асосида электромагнит кучлар таъсирида бўлган электрўтказувчан юпка жисмлар учун материал констракцияси ва механик хусусиятлари аниқланади.

2. Гамильтон-Остроградский умумлаштирилган тамойилига асосан юпка жисмлар учун чизиқли эластиклик назарияси Коши муносабатлари ва Гук қонуни ҳамда электродинамика чизиқли назарияси мутаносиблиги, жумладан Максвелл тенгламаларини ҳисобга олган ҳолда, яъни электромагнит майдон Лоренц пондеромотор ҳажмий кучлари, сирт ва контур кучлар эса Максвелл электромагнит тензори орқали аниқланганиши асосида юпка жисмлар учун Кирхгоф-Ляв гипотезасини қўллаб юпка қобиклар ва пластиналар магнитоэластиклик икки ўлчамли янги математик моделлари ишлаб чиқилади.

3. Мураккаб шаклдаги юпка электрўтказувчан жисмларнинг (пластиналар ва қобикларнинг) деформацион ҳолатига электромагнит майдонлар таъсир этишини тавсифловчи чегаравий шартлари мавжуд хусусий ҳосилаларни дифференциал тенгламалар тизимини ечиш алгоритмлари ва сифат жиҳатдан сонли-тахлилий Бубнов-Галеркин вариацион ҳамда R-функциялар тузилмавий (RFM) усулларини биргаликда қўлланиши орқали дискрет тенгламалар (дискрет моделлар) ишлаб чиқилади.

4. Мураккаб конфигурацияли юпка магнитоэластик пластиналар ва қобикларнинг асосий чегаравий шартлари учун ечимлар тузилмаси (координата функцияларининг кетма-кетлиги) R-функциялар усули ёрдамида яратилади, ҳамда юпка жисмлар мураккаб соҳалари (икки ва тўртта айлана кесимли айлана, кўпбурчак, айланасимон бурчакли тўғри тўрт бурчак ва бошқалар) учун R-функциялар алгебраик мантиқий назариясининг қартеж амаллари ёрдамида нормаллаштирилган тенгламалар қурилади.

5. Юпка жисмлар магнитоэластиклик дискрет моделлари учун вектор-матрица кўринишида аниқланган, чизиқли алгебраик ва бошланғич шартли оддий дифференциал тенгламалар системалари аниқлайдиган, юпка конструкцияларни моделлаштиришнинг блокли матрицалари шакллантирилади, квадратур формулалар, Ньюмарк усули, Гаусс усулларини қўллашга асосланган системаларни сонли ечиш усуллари ва алгоритмлари ишлаб чиқилади.

6. Мураккаб шаклли юпка пластиналар ва қобиклар магнитоэластик синф масалаларини ечиш алгоритмларининг модулли тахлили ўтказилган ва юпка жисмларни R-функциялар усули ёрдамида ҳисоблаш учун компьютерда ўнта асосий модулдан иборат дастурлар мажмуа шаклида дастурий таъминот ишлаб чиқилади.

7. Классик шаклдаги (квадрат, айлана) юпка пластиналар магнитоэластиклигини ҳисоблашда олинган сонли натижалар тўғрилиги R-функциялар усулида олинган сонли ечимлар аниқ ечимлар билан таққосланиб, асослаб берилган, шу билан бирга қаттиқ ва шарнир маҳкамланган чегаравий шартли пластиналар кўрилади. Мураккаб конструкцион шаклли юпка пластиналар магнитоэластиклигини R-функциялар усули ёрдамида қурилган ечимлар координата функциялари сонига нисбатан ҳамда икки қарра интегралларни ҳисоблашда боғланмалар (нуқталар) сонига нисбатан ҳисоблаш алгоритми яқинлашиши тадқиқ қилинган. Базис полиноми сифатида даражали полином танлаб олинган ва полином даражаси 3-4 бўлганда (координата функциялари 10-15 га тенг) яхши яқинлашиши кузатилади.

8. Ишлаб чиқилган алгоритмик дастурий инструментарий (мажмуа) асосида мураккаб шаклли (икки ёки тўрт айлана кесимли, мураккаб кўпбурчак, ҳалқа шаклидаги) юпка пластинкаларни магнитоэластиклик статикаси масалаларини ечиш бўйича ҳисоблаш тажрибалари ўтказилган. Берилган магнит майдони турли қийматларга ва магнит майдон кучланиш турли йўналишларга эга бўлган ҳолатда чегарада шарнир ва қаттиқ маҳкамланган пластиналарнинг деформацион ҳолатига электромагнит майдон статик таъсири аниқланади.

9. Чегаралари қаттиқ, шарнир маҳкамланган, эркин пластиналарнинг деформацион ҳолатига ишлаб чиқилган алгоритмик дастурий мажмуа асосида электромагнит майдоннинг динамик таъсири кўриб чиқилган ва R-функциялар усулида мураккаб шаклли юпка жисмлар магнитоэластиклик динамикаси масалаларини ечиш бўйича ҳисоблаш тажрибалари ўтказилган. Ташқи электромагнит майдонда жойлашган электрўтказувчан материалдан ясалган ўзгармас қалинликка эга пластиналар масаласи кўриб чиқилган. Бу масала икки босқичда ечилади: биринчи босқичда – электростатика масаласи ечими топилади ва магнит майдон кучланиш қиймати аниқланади, иккинчисида эса магнит майдон кўрсаткичлари магнитоэластиклик масаласига киритилиб бажарилади. Мураккаб конструкцион шаклли юпка жисмлар деформацион ҳолатига электромагнит майдоннинг динамик таъсири аниқланади.

10. Олинган натижалар ва алгоритмик дастурий мажмуа мураккаб шаклли юпка қобиклар ва пластиналар магнитоэластиклигининг муайян масалаларини ечиш усулларини татбиқ қилиш натижасида 127,8 млн. сўмлик иқтисодий самодорликка эришилади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ 16.07.2013.Т/ФМ.29.01 при ТАШКЕНТСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ и
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

НУРАЛИЕВ ФАХРИДДИН МУРОДИЛЛАЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА
ДЕФОРМАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКИХ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ R-ФУНКЦИЙ**

**05.01.07 – Математическое моделирование.
Численные методы и комплексы программ
(технические науки)**

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Тема докторской диссертации зарегистрирована за №30.09.2014/В2014.5.Т302 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Докторская диссертация выполнена в Центре разработки программных продуктов и аппаратно-программных комплексов при Ташкентском университете информационных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице Научного совета www.tuit.uz и образовательной информационной сети «ZİYONET» (www.ziynet.uz).

Научный консультант: Назиров Шодманкул Абдиризович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Кашбергенов Батырбек Тулебергенович
доктор технических наук

Мухамедиева Дялвоз Тулкуновна
доктор технических наук, профессор

Нармурадов Чарй Бегалевич
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Филиал Российского государственного университета нефти и газа им. И.М.Губкина в г. Ташкенте

Защита диссертации состоится «12» УЮНД 2016 г. в 10.00 часов на заседании научного совета 16.07.2013.Т/ФМ.29.01 при Ташкентском университете информационных технологий и Национальном университете Узбекистана. (Адрес: 100202, г. Ташкент, улица Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер 25/6). Адрес: 100202, Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43.

Автореферат диссертации разослан «25» УЮНД 2016 года.
(протокол рассылки № 28 от «25» УЮНД 2016 г.).



[Signature]
Х.К.Арипов
Председатель научного совета по
присуждению учёной степени доктора наук,
д.ф.-м.н., профессор

[Signature]
М.С.Якубов
Ученый секретарь научного совета по
присуждению учёной степени доктора наук,
д.т.н., профессор

[Signature]
Н.Равшанов
Председатель научного семинара при
научном совете по присуждению учёной
степени доктора наук, д.т.н.

ВВЕДЕНИЕ (Аннотация докторской диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. На сегодняшний день в технике наблюдается стремительное развитие теории связанных полей, в частности, типичным примером такого направления исследований является магнитоупругость, т.е. теории взаимного влияния двух или более физических полей. В мире электромагнитные датчики пользуются большим спросом, по статистике только на автомобильном рынке доходы от их продаж в 2012 году составили 812,2 млн. долларов США, в следующем 2013 году они возросли на 9,5%, а в последующие два года данный показатель вырос на 6-7%, и к концу 2016 года ожидается, что объем от доходов достигнет 1,1 млрд. долларов США¹.

В Узбекистане проведены широкомасштабные мероприятия по применению магнитоупругих тонких тел в технических конструкциях и выявлению влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел. В этом плане, важное значение имеет разработка методов определения влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел сложной конфигурации, разработка методов и алгоритмов решения систем дифференциальных уравнений в частных производных с начально-краевыми условиями определяющие магнитоупругость тонких пластин и оболочек сложной конструкционной формы, нацеленное на исследование принципов создания магнитокумулятивных генераторов, устройств по удержанию плазмы в термоядерных установках, магнитогидродинамических ускорителей, бесконтактных магнитных опор движущихся систем, качественное и долговременное использование измерительной аппаратуры, работающей в области действия электромагнитных полей.

В мире особое внимание уделяется моделированию процессов влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел, разработке математических моделей и численно-аналитических методов решения дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и краевыми условиями определяющие магнитоупругость тонких пластин и оболочек сложной конструкционной формы, с помощью метода R-функций формирование систем и структур решений удовлетворяющие граничным условиям для магнитоупругих пластин и оболочек сложной конфигурации, что вызывает особый интерес со стороны научного сообщества. В этой области осуществление целенаправленных научных исследований является приоритетными задачами, в том числе, научные исследования в следующих направлениях: разработка численно-аналитических методов и алгоритмов решения систем дифференциальных уравнений в частных производных с начально-краевыми условиями, описывающие влияние электромагнитных полей на тонкие электропроводные тела (пластины, оболочки) сложной конфигурации;

¹ <http://www.digitimes.com/>

разработка комплекса программных средств с помощью метода R-функций, магнитоупругости тонких тел сложной формы, алгоритмов расчета класса задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной формы; проведение вычислительных экспериментов по определению степени влияния электромагнитного поля на тонкие пластины и оболочки со сложной конструкционной формой, разработка алгоритмов решения задач статики и динамики магнитоупругости тонких тел.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлениях Президента Республики Узбекистан за № ПП-1730 от 21 марта 2012 года «О мерах по дальнейшему внедрению и развитию современных информационно-коммуникационных технологий», №ПП-1442 от 15 декабря 2010 года «О приоритетах развития промышленности Узбекистана в 2011-2015 годах» и Кабинета Министров Республики Узбекистан за №64 от 7 марта 2012 года «О дополнительных мерах по сокращению производственных затрат и снижению себестоимости продукции в промышленности», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в сфере.

Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии приоритетного направления развития науки и технологий республики IV. «Развитие информатизации и информационно-коммуникационных технологий».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации². Научные исследования, направленные на разработку математических моделей процессов влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных пластин и оболочек, аналитических и численных методов решения, вычислительных алгоритмов, программных средств осуществляются в ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира, в том числе, Company Fluke, Allegro Microsystems, Purdue University (США), Cargo Care Solutions, University of Bonn (Германия), Hefei University of Technology, Shanghai Jiaotong University (Китай), Seoul National University (Южная Корея), Yamaha wa Alps Electric, Asahi Kasei Microsystems (Япония), National Technik University of Athena (Греция), Micronas (Швейцария), Melexis (Бельгия), ОАО Электроаппарат, Московский Государственный Университет (Россия), ОАО Электроизмеритель, Киевский национальный университет (Украина), «Фан ва тараккиёт» государственное унитарное предприятие (Узбекистан).

В результате исследований, проведенных в мире об эффектах взаимосвязи механических, электромагнитных и температурных полей в рамках линейных соотношений получены ряд научных результатов, в том числе: с использованием уравнений Максвелла на основе физических

² Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации осуществляется на основе <http://www.eriez.com/>, <http://docs.lib.purdue.edu/>, <http://www.cargocaresolutions.com/>, <http://www.sciencedirect.com/>, <http://link.springer.com/>, <http://www.iccm-central.org/>, <http://www.university-directory.eu>, <http://www.digitimes.com/>, <https://www.ibs.com/> и других источников.

вариационных принципов составлены уравнения теории магнитоупругости тонких пластин и предложен метод интерполяционных матриц их решения (Hefei University of Technology, Shanghai Jiaotong University, Китай); на основе гипотез Кирхгофа-Лява и электромагнитных полей построены математические модели электроупругих пластин и оболочек и с помощью математических методов изучены поверхностные волны Релея и Лэмба в магнитоупругих средах (National Technik University of Athena, Греция); учеными Сеульского национального университета разработаны частные модели электромагнитоупругости пьезоэлектрических и пьезомагнитных пластин (Seul National University, Южная Корея); на основе анализа практического применения разработаны механизмы широкого использования тонких магнитоупругих тел в различных отраслях промышленности (Eriez Manufacturing Co, Fluke, США, Cargo Care Solutions, Германия).

В мире проводятся исследования по ряду приоритетных направлений по разработке математических моделей электромагнитоупругости пьезоэлектрических и электропроводных тел, построение их линейных и нелинейных моделей, в том числе: развитие гипотез электромагнитоупругости тонких оболочек и пластин; разработка методов и вычислительных алгоритмов решения задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек в линейной и нелинейной постановках, проведение вычислительных экспериментов по определению степени влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких пластин и оболочек сложной конструкционной формы, обеспечивающее решение задач статики и динамики магнитоупругости тонких тел с помощью метода R-функций.

Степень изученности проблемы. Математическому моделированию процессов влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел, исследованию магнитоупругости тонких пластин и оболочек, имеющих сложную конструкционную форму, формированию систем и структур решений удовлетворяющие граничным условиям при сложной конфигурации магнитоупругих пластин и оболочек с помощью метода R-функций, решению систем дифференциальных уравнений, описывающих магнитоупругость тонких пластин и оболочек со сложными конструкционными формами, дискретизации по пространственным переменным и построению дискретных моделей магнитоупругости тонких тел, разработке методов решения задач электромагнитоупругости тонких тел на основе векторно-матричных методов решения посвящены научно-исследовательские работы таких зарубежных и республиканских ученых, как S.Kaliski, K.Hiroyuki (Hefei University of Technology), J.Tani (Shanghai Jiaotong University), D.Georg, Z.B.Kuang (Seoul National University), D.Hasanyan, Д.И.Бардзюкаса (National Technik University of Athena), С.А.Амбарцумяна, Г.Е.Багдасаряна, М.В.Белубекяна, В.Л.Рвачева, Л.В.Курпа, Л.В.Мольченко (Киевский национальный университет), И.Т.Селезов, М.Р.Короткиной (Московский государственный университет),

Х.А.Рахматулина, В.К.Кабулова, Ш.А.Назирова, Т.Юлдашева, Р.Индиаминова и других авторов.

Работы ученых S.Kaliski, K.Hiroyuki, J.Tani, D.Georg, Л.В.Мольченко, Р.Индиаминова, М.Р.Короткиной посвящены построению математических моделей электромагнитоупругости тонких пластин и оболочек, Z.B.Kuang, D.Hasanuan – посвящены изучению линейных уравнений магнитоупругости электроупругих пластин и оболочек. В работах Д.И.Бардзокаса, И.Т.Селезова, С.А.Амбарцумяна, Г.Е.Багдасаряна, М.В.Белубекяна изучены гипотезы электромагнитоупругости, в работах В.Л.Рвачева, Л.В.Курпа, Ш.А.Назирова разработаны метод R-функций, а работы Х.А.Рахматулина, В.К.Кабулова, Т.Юлдашева посвящены исследованию линейных и нелинейных уравнений магнитоупругости пластин и оболочек.

Практически все исследования в области электро- и магнитоупругости сводятся к рассмотрению тонких тел, оболочек (пластин) с классическими, простыми конструктивными геометрическими конфигурациями области с частными граничными условиями. Рассмотрение решения широкого класса задач магнитоупругости тонких тел, описывающиеся общими математическими моделями с естественными граничными условиями, имеющих сложную конструкционную геометрическую конфигурацию области с использованием теории математического моделирования и алгоритмизации, современных компьютерных средств в настоящее время недостаточно полно проведены научные изыскания.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ фундаментальных проектов Центра разработки программных продуктов и аппаратно-программных комплексов при Ташкентском университете информационных технологий Ф-1.2.4. – Алгоритмизация решения классов задач взаимодействия сред и полей» (2003-2007), ФА-Ф1-Ф009. «Разработка металингвистической теории алгоритмизации и ее применение к автоматизации построения решения многомерных задач математической физики» (2007-1011), Ф4-ФА-Ф005. «Разработка и исследование алгоритмических методов решения классов многомерных нелинейных задач математической физики для областей сложной конфигурации» (2012-1016), Ф5-016. «Разработка методов и средств решения задач многомерной оптимизации в линейной и нелинейной постановке на базе конструктивного метода R-функций» (2012-1016).

Целью исследования является разработка алгоритмов и программных средств математического моделирования влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел сложной конфигурации с помощью метода R-функций и численно-аналитических методов.

Задачи исследования:

формирование основополагающих геометрических и физических соотношений линейной теории упругости и линейной электродинамики с учетом свойств конструкции и механических характеристик материала для электропроводных тонких тел, находящихся под влиянием электромагнитных сил, и построение математических моделей магнитоупругости тонких пластин и оболочек;

разработка численно-аналитических методов решения систем дифференциальных уравнений в частных производных с начально-краевыми условиями, определяющих математические модели магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной конструкционной формы на базе вариационных методов с использованием теории R-функций;

формирование структур и систем решений для основных краевых условий задач магнитоупругих пластин и оболочек, имеющих сложную конфигурацию методом R-функций;

разработка вычислительных алгоритмов решения систем разрешающих уравнений магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной формы, что включает дискретизацию по пространственным переменным и построение дискретных моделей магнитоупругости тонких тел;

разработка алгоритмов решения классов задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной конструкционной формы на основе векторно-матричных численных методов и создание программного обеспечения в виде комплекса программ;

обоснование достоверности полученных численных результатов расчета методом R-функций и адекватности математических моделей магнитоупругости тонких пластин и оболочек;

проведение вычислительных экспериментов по исследованию влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких пластин и оболочек сложной конструкционной формы и решение задач статики и динамики магнитоупругости тонких тел на основе усовершенствованного метода R-функций.

Объектом исследования является обеспечение степени магнитоупругости тонких тел (пластин и оболочек) сложной конструкционной конфигурации.

Предметом исследования являются математические модели, численно-аналитические алгоритмы и алгоритмически-программные средства для исследования влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел сложной конструкционной формы методом R-функций.

Методы исследования. В процессе исследования применены методы математического и численного моделирования, законы электродинамики, вариационные принципы, вычислительная математика, методология алгоритмизации, технология модульного и системного программирования и методы вычислительного эксперимента.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

на основе обобщенного вариационного принципа Гамильтона-Остроградского с использованием линейной теории упругости с учетом электромагнитных сил Лоренца разработаны математические модели, описывающие процессы влияния электромагнитных полей на деформированное состояние тонких электропроводных тел;

разработаны численно-аналитические методы и алгоритмы решения систем дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями, описывающие влияние электромагнитных полей на тонкие электропроводные тела (пластины и оболочки) сложного конструкционного очертания при совместном применении вариационного метода Бубнова-Галеркина и структурного метода R-функций;

сформированы структуры и системы решений, удовлетворяющие практическим краевым условиям при жестко-зашемленном, шарнирно-опертом крае магнитоупругих пластин и оболочек имеющих сложную конфигурацию (с вырезами);

на основе алгоритмов решения классов задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной конструкционной формы разработан комплекс программных средств расчета магнитоупругости тонких пластин и оболочек на компьютере;

показана сходимость вычислительного алгоритма относительно количества координатных функций структуры решений, обоснованы практическая применимость метода и достоверность полученных численных результатов расчета магнитоупругости тонких тел путем сравнения с точными решениями;

разработан алгоритм для проведения вычислительных экспериментов для исследования статического и динамического влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких идеально-проводящих тел сложной конструкционной формы.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

построены математические модели магнитоупругости тонких пластин и оболочек, определяющие влияние электромагнитных полей на тонкие электропроводные тела, имеющие сложную геометрически конструкционную конфигурацию с учетом которых позволит увеличить качество работы электронной техники;

разработаны численно-аналитические методы и программно-алгоритмический инструментарий на основании структурного метода R-функций, что даёт возможность проводить серии вычислительных экспериментов по решению практических задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной конструкционной формы;

построенные новые методы математического моделирования процессов напряженно-деформированного состояния магнитоупругих пластин и оболочек позволили оценить 10-12%, а в некоторых практических случаях и большее влияние электромагнитных полей на тонкие электропроводные тела, имеющие сложную геометрически конструкционную конфигурацию.

Достоверность результатов исследования обосновывается корректностью постановки задачи на основе вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, строгостью математических выкладок, использованием обоснованных методов решения, исследованием сходимости вычислительных алгоритмов на основе метода Бубнова-Галеркина и метода R-функций, а также путем сравнения полученных приближенных решений с точными решениями в аналогичных постановках.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Усовершенствование и разработка существующих универсальных методологий научного исследования алгоритмическим методом, математического моделирования, создание универсальных вычислительных алгоритмов на основе численно-аналитических методов, таких как вариационный метод и структурный метод, базирующихся на теории R-функций, а также алгоритмическо-программного инструментария позволят автоматизировать решение широкого круга новых задач в области магнитоупругости тонких пластин и оболочек, имеющих сложную конструкционную конфигурацию области.

Практическая значимость работы заключается в том, что исследования позволяют повысить качество и ускорить проведение предпроектных расчетов конструкций, основу которых составляют упругие тонкие тела, в частности пластинки и оболочки сложной конструкции в плане, находящиеся в электромагнитном поле, а также применение магнитоупругих датчиков, показали ключевую роль в системах безопасности автомобилей, требуемых нормативными документами, системы электронного управления устойчивостью, созданные для предотвращения заноса транспортного средства, относительно дорогих датчиков угла поворота руля.

Внедрение результатов исследования. Математическое моделирование процессов влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел методом R-функций в виде разработанных математических моделей, вычислительных алгоритмов на базе комбинации вариационного метода Бубнова-Галеркина и структурного метода R-функций и комплекса программных средств решения классов задач взаимодействия электромагнитных и деформационных полей использованы в рамках хоздоговора 22/08 в «НИИ Алгоритм-инжиниринг» (справка № 24-8/2475 от 22 июня 2015 года Министерство по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан). Применение научных результатов позволило автоматизировать процесс оценки влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел сложной геометрической конфигурации с помощью метода R-функции и алгоритмов математического моделирования.

Апробация работы. Теоритические и прикладные результаты диссертации апробированы в следующих на международных и республиканских конференциях и семинарах: «Современные проблемы математической физики и информационных технологий» (Ташкент, 2005); «Современные проблемы и перспективы механики» (Ташкент, 2006); «IC

2006» (Ташкент, 2006); «Актуальные проблемы прикладной математики и механики» (Харьков, 2006); «Актуальные проблемы механики сплошной среды и прочности конструкций» (Днепропетровск, 2007); «Современные проблемы математического моделирования и вычислительных технологий» (Красноярск, 2008); «Новые математические модели в механике сплошных сред: построение и изучение» (Новосибирск, 2009); DSMSI-2009 (Киев, 2009); «Распространение упругопластических волн» (Бишкек, 2009); «Современные проблемы механики» (Ташкент, 2009); «XIII международная научная конференция памяти академика М.Кравчука» (Киев, 2010); AICT2010 (Ташкент, 2010); ND-KhPI (Севастополь, 2013); «KHU-TUIT International Conference for ICT & Knowledge Economy» (Ташкент, 2014); «International scientific and practical conference» (Dubai, 2015); «Современное состояние и перспективы развития информационных технологий» (Ташкент, 2011); «Информационные технологии и проблемы телекоммуникаций» (Ташкент, 2013).

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы всего 52 научных работ. Из них 13 научных статей, в том числе 9 в республиканских и 4 в зарубежных журналах рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Объем и структура диссертации. Структура диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, список использованной литературы, приложений. Объем диссертации составляет 182 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность и востребованность проведенного исследования, цель и задачи исследования, характеризуются объект и предмет, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии республики, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, раскрываются научная и практическая значимость полученных результатов, внедрение в практику результатов исследования, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе «Анализ современного состояния влияния электромагнитных полей на деформационное состояние электропроводных тонких тел» диссертации дается анализ современного состояния исследований влияния электромагнитных полей на электропроводные тонкие тела, изучены тенденции развития и современные методы определения влияния электромагнитных полей на электропроводные тонкие тела и дана формализация задачи математического моделирования влияния электромагнитных сил на электропроводные тонкие тела со сложной формой методом R-функций.

Первой работой в области магнитоупругости была работа Л.Кнопффа, в которой используя упрощенную модель показано, что магнитоупругие воздействия на распределение упругих волн в магнитном поле Земли играют лишь незначительную роль.

Важными для развития магнитоупругости тонких тел были работы польских ученых. Они решили большое количество различных задач и вопросов взаимодействия электромагнитного поля с упруго-, а также и пластически деформируемыми телами. В частности, ими исследованы магнитоупругие колебания идеально проводящих пластинки и стержня в магнитном поле. При совместном рассмотрении уравнения Максвелла в вакууме и уравнения движения пластинки (стержня) получено уравнение поперечных колебаний пластинки, содержащее члены электромагнитного происхождения. Решая это уравнение, определяют механические параметры пластинки и характеристики электромагнитного поля как тела пластинки, так и среды, в которой колеблется пластинка. Рассмотрена задача о периодических вынужденных колебаниях бесконечной пластинки. Также рассмотрена задача магнитоупругих плоских резонансных колебаний идеально проводящей пластинки в магнитном поле, где показано, что в магнитном поле, вследствие излучения электромагнитных волн в окружающую пластинку среду, амплитуда колебаний пластинки остается ограниченной.

Зарубежные ученые исследовали влияние магнитного поля на статическую и динамическую устойчивость тонкой упругой пологой цилиндрической панели, сжатой вдоль образующей и обтекаемой с внешней стороны сверхзвуковым потоком сжимаемого невязкого слабопроводящего газа с невозмущенной скоростью, направленной параллельно образующей.

Задача решена в геометрически нелинейной постановке с использованием метода Бубнова-Галеркина. Показано, что увеличение напряженности магнитного поля приводит к уменьшению нижнего критического усилия, но к существенному увеличению критической скорости флаттера. Далее в работах российских ученых исследуется распространение волн в электропроводящих упругих средах в электромагнитном поле. Из анализа построенных решений новых задач распространения неустановившихся и бегущих магнитоупругих волн, а также рассеяния магнитоакустических волн получены качественные и количественные оценки влияния эффектов, связанных с магнитоупругими взаимодействиями. Увеличение электропроводности среды и напряженности внешнего магнитного поля снижает интенсивность рассеянных полей и изменяет расположение нулей и экстремумов в диаграммах направленности. Построено также решение обратной задачи рассеяния электромагнитных волн на неоднородной анизотропной плазме и доказана единственность решения. Также исследуется влияние магнитного поля и пограничного слоя на флаттерные колебания. Рассматривается математическая постановка задачи для диэлектрической пластины, обтекаемой слабопроводящей средой, выведены уравнения устойчивости и выполнен численный анализ. Обнаружены качественно различные области параметров, в которых влияние магнитного поля на устойчивость может проявляться как стабилизирующее, так и дестабилизирующее. Показано, что реальные магнитные поля могут существенно влиять на критические скорости флаттера. Рассмотрены также нелинейные флаттерные колебания, основанные на решениях задачи обтекания цилиндра с возмущенной поверхностью и на дифференциальных уравнениях геометрически нелинейной теории оболочек. Методом Бубнова (двулученная аппроксимация) исследуется статическая и динамическая устойчивость квадратной цилиндрической панели. Оценивается влияние магнитогидродинамических эффектов на критические усилия.

Ученые из Украины в своих работах предложили, что нормальный к срединной поверхности пластинки элемент в задачах электромагнитоупругости может деформироваться, изменяя свою длину. Показано, что деформационная неоднородность обуславливает перераспределение свободного электричества. При этом электрические заряды концентрируются в наиболее напряженных участках. Учет изменения длины нормального элемента существенно влияет на изменение электрического потенциала пластинки.

В частных случаях, когда материал пластины или оболочки идеально проводящий или бесконечная пластинка имеет конечную электропроводность, задача магнитоупругости решается относительно просто.

В общем случае, когда пластина или оболочка имеет конечные размеры, а ее материал конечнопроводящий, решение поставленной задачи становится достаточно сложным.

Известные исследователи армянской школы в области магнитоупругости, своеобразно трактуя метод совместного асимпто-

тического интегрирования трехмерных уравнений электродинамики и теории упругости, сформулировали гипотезы магнитоупругости тонких тел, имеющих конечные размеры и конечную проводимость.

Задача колебания электропроводной изотропной пластинки во внешнем магнитном поле сводится к совместному решению системы дифференциальных уравнений магнитоупругости для внутренней области пластинки и уравнений электродинамики во внешней области.

Предложенный метод был применен для решения различных задач магнитоупругости пластин конечных размеров, изготовленных из материала конечной проводимости при наличии магнитных полей.

Далее в работах обсуждаются основные положения магнитоупругости тонких тел типа оболочек и пластин. Рассматриваются как общие вопросы теории, так и решения многочисленных задач, представляющих большой интерес с точки зрения приложений. В частности, исследуются вопросы колебаний и устойчивости различных типов оболочек и пластин, изготовленных из материала конечной проводимости. Рассматриваются задачи флаттера изотропных и анизотропных оболочек и пластин, обтекаемых электропроводящей жидкостью или газом, исследуются вопросы колебаний и устойчивости токонесущих пластин и оболочек.

На основе анализа результатов, полученных при точном решении некоторых частных задач магнитоупругости, и рассмотрения общих асимптотических решений трехмерных уравнений магнитоупругости в случае оболочек и пластин сформулирована гипотеза магнитоупругости тонких тел. Эта гипотеза позволила построить общую теорию магнитоупругости тонких оболочек и пластин и указать пути эффективного решения многочисленных прикладных задач.

Приводятся также точные решения некоторых задач, которые одновременно используются для оценки точности предложенной прикладной теории.

В совместных работах российских, украинских и узбекских ученых изучаются колебания и устойчивость упругих систем во внешнем магнитном поле. Определяются частоты малых собственных колебаний прямоугольных пластин, стержней и круговых цилиндрических оболочек во внешнем магнитном поле, находятся критические значения магнитного поля, ограничивающего область существования периодических движений. Рассматривается параметрический резонанс пластин и кругового цилиндра в периодически изменяющемся магнитном поле. Решается нелинейная задача изгиба пластины и мембраны, связанная с учетом расжатия ее срединной поверхности. Составлены уравнения магнитоупругости круговой цилиндрической оболочки в продольном магнитном поле и рассмотрены упругие колебания цилиндра и вращающегося упругого кольца в его плоскости с учетом переносной и кориолисовой сил инерции и распределенных моментов от электромагнитных сил. Отмечен гиромагнитный эффект деформационного происхождения в кольце и цилиндре. Изучается движение упругого тела, связанного с гироскопом.

Рассматриваются крутильные колебания упругой цепной системы с распределенной массой, стержня с массами на концах и гироскопом, устойчивость электромеханической системы как системы с бесконечным числом степеней свободы при наличии гироскопических сил, крутильные колебания во внешнем магнитном поле упругого стержня (вала) как элемента гироскопической системы. Также исследуются пьезоэлектрики, рассматриваются вопросы существования и распространения поверхностных волн в пьезокерамике, поляризованной по толщине, вопросы связанных радиально-поперечных колебаний пьезокерамических дисков.

Проведенный обзор исследований в области магнитоупругости, электроупругости и электромагнитоупругости тонких пластин и оболочек, а также по методам их решения за последние 15-20 лет дает основание утверждать, что исследование методов математического моделирования влияния электромагнитных полей на тонкие электропроводные тела остается нерешенной и востребованной проблемой, имеющей важное научно-техническое значение.

Вторая глава «Математическое моделирование процессов влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел» диссертации посвящена принципам математического моделирования и разработке математических моделей процессов влияния электромагнитных полей на тонкие электропроводные тела (пластины и оболочки).

Здесь основные уравнения теории упругости тонких пластин и оболочек выводятся на основании вариационного принципа Гамильтона-Остроградского. При построении конкретных моделей используются геометрические соотношения Коши и физические соотношения, в обратной форме закона Гука, а также закон изменения перемещений. При выводе уравнения используется прямоугольная система координат.

Вариационный принцип Гамильтона-Остроградского записывается в следующем виде:

$$\delta \int (T - \Pi + A) dt = 0, \quad (1)$$

где: T – кинетическая и Π – потенциальная энергии; A – работа внешних сил.

Теория оболочек (пластин) основана на геометрической гипотезе, согласно которой нормальный к срединной поверхности прямолинейный элемент оболочки после деформации остается прямолинейным, нормальным к этой поверхности в ее деформированном состоянии и сохраняет свою длину. Данная гипотеза (Кирхгофа-Лява) допускает, что деформация оболочки происходит без деформации сдвига и в плоскостях нормальных сечений и без деформации удлинения по толщине оболочки.

В технической теории оболочек наиболее распространены упрощенные уравнения, так называемые уравнения теории оболочек Муштари-Донелла-Власова, базирующиеся на некоторых дополнительных допущениях. Под пологими оболочками понимают оболочки, имеющие незначительный подъем по сравнению с характерными размерами срединной поверхности

оболочки. В частности, в монографии В.З.Власова пологими подразумеваются оболочки, имеющие в плане форму прямоугольника с максимальной стрелой подъема не более 1/5 от наименьшей стороны прямоугольника. К этой категории оболочек относятся также слегка искривленные пластины. Для пологих оболочек внутренняя геометрия срединной поверхности отождествляется с евклидовой геометрией на плоскости. Наиболее простая форма уравнения равновесия представляется в декартовых координатах.

Аналитически гипотеза Кирхгофа-Лява имеет вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= (1 + k_1 z)u - z \frac{\partial w}{\partial x}, \\ u_2 &= (1 + k_2 z)v - z \frac{\partial w}{\partial y}, \\ u_3 &= w, \end{aligned} \quad (2)$$

где u_1, u_2, u_3 – перемещения в произвольной точке оболочки (пластины); u, v, w – перемещения срединной поверхности оболочки (пластины); k_1, k_2 – главные кривизны срединной поверхности; $k_1 = 1/R_1, k_2 = 1/R_2$; здесь R_1, R_2 – главные радиусы кривизны. В случае пластин $k_1 = k_2 = 0$.

С учетом сил электромагнитного происхождения вариация работы определяется в виде

$$\begin{aligned} \int_V \delta A dt &= \iiint_V [(X + \rho K_x) \delta u_1 + (Y + \rho K_y) \delta u_2 + (Z + \rho K_z) \delta u_3] dV dt + \\ &+ \iint_{\Gamma} [(q_x + T_{xx}) \delta u_1 + (q_y + T_{yy}) \delta u_2 + (q_z + T_{zz}) \delta u_3] \Big|_z dx dy dt + \\ &+ \iint_{\Gamma} [(P_x + T_{xx}) \delta u_1 + (P_y + T_{yy}) \delta u_2 + (P_z + T_{zz}) \delta u_3] \Big|_x dx dy dt + \\ &+ \iint_{\Gamma} [(F_x + T_{yx}) \delta u_1 + (F_y + T_{xy}) \delta u_2 + (F_z + T_{yz}) \delta u_3] \Big|_y dx dz dt, \end{aligned} \quad (3)$$

где $X, Y, Z, \rho K_x, \rho K_y, \rho K_z$ – составляющие объемных сил; $q_x = q_x^+ + q_x^-$, $q_y = q_y^+ + q_y^-$, $q_z = q_z^+ + q_z^-$, $T_{xx} = T_{xx}^+ + T_{xx}^-$, $T_{yy} = T_{yy}^+ + T_{yy}^-$, $T_{zz} = T_{zz}^+ + T_{zz}^-$ – составляющие поверхностных сил; $P_x, P_y, P_z, T_{xy}, T_{yx}, T_{xz}, F_x, F_y, F_z, T_{yx}, T_{xy}, T_{yz}$ – составляющие контурных сил.

Подставляя в вариации работы внешних сил (3) соответственно перемещения из (2) и выполняя соответствующие операции, в частности, интегрирования, интегрирования по частям, приведение подобных членов, также замены выражений получим:

$$\begin{aligned} \int_V \delta A dt &= \iiint_V \left[(N_x + R_x + k_1 M_x + k_1 M_{xx} + q_x + T_{xx} + k_1 q_x \left(\frac{h}{2}\right) + k_1 q_x \left(-\frac{h}{2}\right) + \right. \\ &\quad \left. + k_1 T_{xx} \left(\frac{h}{2}\right) + k_1 T_{xx} \left(-\frac{h}{2}\right) \right] \delta u_1 + \\ &+ (N_y + R_y + k_2 M_y + k_2 M_{yy} + q_y + T_{yy} + k_2 q_y \left(\frac{h}{2}\right) + k_2 q_y \left(-\frac{h}{2}\right) + k_2 T_{yy} \left(\frac{h}{2}\right) + k_2 T_{yy} \left(-\frac{h}{2}\right) \delta v + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (N_x + R_x + q_x + T_{xx} - \frac{\partial}{\partial x} M_x - \frac{\partial}{\partial x} M_{Rx} - \frac{\partial}{\partial y} M_y - \frac{\partial}{\partial y} M_{Ry} + \\
& \quad + \frac{\partial}{\partial x} (q_x(\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial x} (q_x(-\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx}(\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx}(-\frac{h}{2})) + \\
& \quad + \frac{\partial}{\partial y} (q_y(\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial y} (q_y(-\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy}(\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy}(-\frac{h}{2})) \delta w \Big] dx dy dt + \\
& + \int \int_{t,y} (N_{Fx} + N_{Txx} + k_1 M_{Fx} + k_1 M_{Txx}) \delta u + (N_{Fy} + N_{Tyy} + k_2 M_{Fy} + k_2 M_{Tyy}) \delta v + \\
& \quad + (N_{Fx} + N_{Txx} + \frac{\partial}{\partial y} M_{Fx} + \frac{\partial}{\partial y} M_{Txx} - q_x(\frac{h}{2}) - q_x(-\frac{h}{2}) - T_{xx}(\frac{h}{2}) - T_{xx}(-\frac{h}{2}) - \\
& \quad - q_y(\frac{h}{2}) - q_y(-\frac{h}{2}) - T_{xy}(\frac{h}{2}) - T_{xy}(-\frac{h}{2}) \delta w \Big] \Big|_x dy dt + \\
& + \int \int_{t,x} (N_{Fz} + N_{Tzx} + k_2 M_{Fz} + k_2 M_{Tzx}) \delta u + (N_{Fy} + N_{Tyy} + k_2 M_{Fy} + k_2 M_{Tyy}) \delta v + \\
& \quad + (N_{Fz} + N_{Tzx} + \frac{\partial}{\partial x} M_{Fz} + \frac{\partial}{\partial x} M_{Tzx} - q_y(\frac{h}{2}) - q_y(-\frac{h}{2}) - T_{xy}(\frac{h}{2}) - T_{xy}(-\frac{h}{2}) - \\
& \quad - q_x(\frac{h}{2}) - q_x(-\frac{h}{2}) - T_{xz}(\frac{h}{2}) - T_{xz}(-\frac{h}{2}) \delta w \Big] \Big|_y dx dt - \\
& - \int \Big[M_{Fx} + M_{Txx} + M_{Fy} + M_{Tyy} + M_{Fz} + M_{Tzx} + M_{Fy} + M_{Tyy} \Big] \delta w \Big|_x \Big|_y dt .
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
N_x &= \int_z X dz, \quad N_y = \int_z Y dz, \quad Q_z = \int_z Z dz, \quad M_x = \int_z z X dz, \quad M_y = \int_z z Y dz, \quad R_x = \int_z \rho K_x dz, \\
R_y &= \int_z \rho K_y dz, \quad R_z = \int_z \rho K_z dz, \quad M_{Rx} = \int_z z \rho K_x dz, \quad M_{Ry} = \int_z z \rho K_y dz, \quad N_{Fx} = \int_z P_x dz, \quad N_{Fy} = \int_z P_y dz, \\
Q_{Fz} &= \int_z P_z dz, \quad M_{Fx} = \int_z z P_x dz, \quad M_{Fy} = \int_z z P_y dz, \quad N_{Txx} = \int_z T_{xx} dz, \quad N_{Tyy} = \int_z T_{yy} dz, \quad Q_{Tzz} = \int_z T_{zz} dz, \\
M_{Txx} &= \int_z z T_{xx} dz, \quad M_{Tyy} = \int_z z T_{yy} dz, \quad M_{Tzz} = \int_z z T_{zz} dz, \quad N_{Fz} = \int_z F_x dz, \quad N_{Fy} = \int_z F_y dz, \quad Q_{Fz} = \int_z F_z dz, \\
M_{Fz} &= \int_z z F_x dz, \quad M_{Fy} = \int_z z F_y dz, \quad N_{Tyz} = \int_z T_{yz} dz, \quad N_{Tyx} = \int_z T_{yx} dz, \quad Q_{Tyz} = \int_z T_{yz} dz, \quad M_{Tyz} = \int_z z T_{yz} dz, \\
M_{Tyx} &= \int_z z T_{yx} dz, \quad M_{Tyz} = \int_z z T_{yz} dz, \quad M_{q_x}^+ = q_x(\frac{h}{2}), \quad M_{q_x}^- = q_x(-\frac{h}{2}), \quad M_{q_y}^+ = q_y(\frac{h}{2}), \quad M_{q_y}^- = q_y(-\frac{h}{2}), \\
M_{T_{xx}}^+ &= T_{xx}(\frac{h}{2}), \quad M_{T_{xx}}^- = T_{xx}(-\frac{h}{2}), \quad M_{T_{yy}}^+ = T_{yy}(\frac{h}{2}), \quad M_{T_{yy}}^- = T_{yy}(-\frac{h}{2}).
\end{aligned}$$

Затем полученные выражения вариации кинетической и потенциальной энергии и работы внешних сил подставляем в вариационный принцип Гамильтона-Остроградского (1). Полученное вариационное уравнение существует при любом значении объема V . Поэтому, в силу произвольности области V , получаем уравнения движения и естественные начальные и граничные условия оболочки:

$$\begin{aligned}
-\rho h \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{\partial N_{12}}{\partial y} + (k_1 - k_2) \frac{\partial M_{12}}{\partial y} + N_x + R_x + q_x + T_{xx} &= 0, \\
-\rho h \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \frac{\partial N_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_{22}}{\partial y} - (k_1 - k_2) \frac{\partial M_{12}}{\partial x} + N_y + R_y + q_y + T_{yy} &= 0,
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
& -\rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 M_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{22}}{\partial y^2} + k_1 N_{11} + k_2 N_{22} - k_1^2 M_{11} - k_2^2 M_{22} + Q_x + R_x - \frac{\partial}{\partial x} (M_x + M_{rx}) - \\
& - \frac{\partial}{\partial y} (M_y + M_{ry}) + q_x + T_x + \frac{\partial}{\partial x} (M_{qx}^+ + M_{qx}^- + M_{rx}^+ + M_{rx}^-) + \frac{\partial}{\partial y} (M_{qy}^+ + M_{qy}^- + M_{ry}^+ + M_{ry}^-) = 0.
\end{aligned}$$

При этом некоторые члены уравнения, в частности, отброшены в силу их незначительного влияния.

Естественные граничные условия следующие:

$$\begin{aligned}
& (-N_{11} + N_{rx} + N_{rx}) \delta U|_x = 0, (-N_{12} + N_{ry} + N_{ry}) \delta V|_x = 0, \\
& \left(-\frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial t} - \frac{\partial M_{11}}{\partial x} - \frac{\partial M_{12}}{\partial y} + Q_{rx} + Q_{rx} - M_{qx}^- - M_{qx}^- - M_{rx}^+ - M_{rx}^- \right) \delta W|_x = 0, \\
& (M_{11} - M_{rx} - M_{rx}) \delta \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_x = 0, (-M_{12} - M_{ry} - M_{ry}) \delta \frac{\partial W}{\partial y} \Big|_x = 0, \quad (5) \\
& (-N_{12} + N_{rx} + N_{rx}) \delta U|_y = 0, (-N_{22} + N_{ry} + N_{ry}) \delta V|_y = 0, \\
& \left(-\frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial x} - \frac{\partial M_{12}}{\partial x} - \frac{\partial M_{22}}{\partial y} + Q_{ry} + Q_{ry} - M_{qy}^+ - M_{qy}^- - M_{ry}^+ - M_{ry}^- \right) \delta W|_y = 0, \\
& (M_{12} - M_{ry} - M_{ry}) \delta \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_y = 0, (M_{22} - M_{ry} - M_{ry}) \delta \frac{\partial W}{\partial y} \Big|_y = 0.
\end{aligned}$$

Таким образом, (4) есть уравнение движения и (5) – граничные условия, налагаемые на весьма пологую оболочку, полученные на основе вариационного принципа Гамильтона-Остроградского при использовании гипотезы Кирхгофа-Лява.

В такой постановке объемные силы электромагнитного происхождения, добавляемые к полным объемным силам, представляются в виде

$$f = \rho \mathcal{K} = \frac{1}{4\pi} (\text{rot}(\text{rot}(U \times H))) \times H, \quad (6)$$

где $U(u_1, u_2, u_3)$ – вектор перемещений; $H(H_x, H_y, H_z)$ – вектор напряженности магнитного поля.

К полной поверхностной и контурной (граничной) силе добавляются электродинамические тензоры напряжений Максвелла

$$T_{ik} = \frac{1}{4\pi} [H_i h_k + h_i H_k] - \frac{\delta_{ik}}{4\pi} \bar{h} \bar{H}, \quad T_{ik}^* = \frac{1}{4\pi \mu} [H_i^* h_k^* + h_i^* H_k^*] - \frac{\delta_{ik}}{4\pi} \bar{h}^* \bar{H}^*, \quad (7)$$

$$\text{где } \delta_{ik} = \begin{cases} 0, & i \neq k, \\ 1, & i = k. \end{cases}$$

Соотношения (4) и (5) с учетом (6) и (7) определяют математическую модель магнитоупругости тонких пластин и оболочек.

Далее рассматриваются вопросы алгоритмизации в магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной формы.

Третья глава «Методы решения краевых задач магнитоупругости тонких тел методом R-функций» посвящена методам решения краевых задач магнитоупругости тонких тел с привлечением метода R-функций.

Для решения поставленной задачи колебания магнитоупругих пластин и пологих тонких оболочек применяется вариационный метод Бубнова-

Галеркина. Как известно, при этом процесс решения задачи состоит из следующих этапов:

- построение последовательности координатных функций (структур решений), удовлетворяющих заданным граничным условиям;
- дискретизация по пространственным переменным, построение разрешающих уравнений, т.е. построение дискретной модели;
- решение разрешающих уравнений, и нахождение неизвестных компонент структуры решений;
- определение неизвестных функций, в нашем случае тангенциальных и нормального перемещений срединной поверхности оболочки.

На первом этапе при построении последовательности координатных функций, удовлетворяющих заданным граничным условиям, использован структурный метод R-функций В.Л.Рвачева. Отметим, что с использованием этого метода строится последовательность координатных функций в виде структуры решений, удовлетворяющих граничным условиям при практически произвольной сложной конфигурации контура оболочек в плане.

В общем случае структуру решений, построенную методом RFM, представляем в виде

$$u = u(\omega, \Phi_1), \quad v = v(\omega, \Phi_2), \quad w = w(\omega, \Phi_3), \quad (8)$$

где

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^{N_1} c_i(t) \varphi_i(x, y), \quad \Phi_2 = \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} c_i(t) \phi_i(x, y), \quad \Phi_3 = \sum_{i=N_1+N_2+1}^{N_1+N_2+N_3} c_i(t) f_i(x, y).$$

Тогда искомые функции (u , v и w) записываем в форме

$$u = \sum_{i=1}^{N_1} c_i(t) u_i(\omega, x, y), \quad v = \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} c_i(t) v_i(\omega, x, y), \quad w = \sum_{i=N_1+N_2+1}^{N_1+N_2+N_3} c_i(t) w_i(\omega, x, y). \quad (9)$$

Здесь ω – нормализованное уравнение границы области оболочки; φ_i , ϕ_i и f_i – некоторые полные (базисные) системы функций (степенной, Чебышева, тригонометрические полиномы и т.п.); c_i – неопределенные коэффициенты структуры решений, подлежащие определению.

Подставляя структуры решений в уравнения (8), (9) и проведя процедуру дискретизации по пространственным переменным x и y , получаем разрешающее уравнение (дискретную модель) для нахождения неопределенных коэффициентов структуры решений.

В случае динамики разрешающее уравнение представляется системой обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ)

$$A\dot{C} + BC = F \quad (10)$$

с начальными условиями

$$C|_{t=t_0} = C_0, \quad \dot{C}|_{t=t_0} = \dot{C}_0, \quad (11)$$

где $A = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix}$,

$$\begin{aligned}
A_1 &= \iint_{\Omega} L_1 u, u, j, d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{1, N_1}, \\
A_2 &= \iint_{\Omega} L_2 v, v, j, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \\
A_3 &= \iint_{\Omega} L_3 w, w, j, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \\
B_{11} &= \iint_{\Omega} L_{11} u, u, j, d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{1, N_1}, \quad B_{12} = \iint_{\Omega} L_{12} v, u, j, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \quad j = \overline{1, N_1}, \\
B_{13} &= \iint_{\Omega} L_{13} w, u, j, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \quad j = \overline{1, N_1}, \\
B_{21} &= \iint_{\Omega} L_{21} u, v, j, d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \\
B_{22} &= \iint_{\Omega} L_{22} v, v, j, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \\
B_{23} &= \iint_{\Omega} L_{23} w, v, j, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \\
B_{31} &= \iint_{\Omega} L_{31} u, w, j, d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \\
B_{32} &= \iint_{\Omega} L_{32} v, w, j, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \\
B_{33} &= \iint_{\Omega} L_{33} w, w, j, d\Omega, \quad i = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3}, \\
C_1 &= \iint_{\Omega} q_1 w, j, d\Omega, \quad j = \overline{1, N_1}, \quad C_2 = \iint_{\Omega} q_2 w, j, d\Omega, \quad j = \overline{N_1 + 1, N_1 + N_2}, \\
C_3 &= \iint_{\Omega} q_3 w, j, d\Omega, \quad j = \overline{N_1 + N_2 + 1, N_1 + N_2 + N_3},
\end{aligned}$$

здесь L_i, L_{ij} - соответствующие дифференциальные операторы уравнений.

В случае статике разрешающее уравнение представляется системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$BC = F. \quad (12)$$

Для решения разрешающих уравнений можно использовать известные численные методы алгебры и анализа, в частности, для решения СОДУ (10), (11) – метод Ньюмарка, а для решения СЛАУ (12) – метод исключения Гаусса. При этом для вычисления определенных интегралов, представляющих компоненты для матриц массы и жесткости, а также компонент вектора правой части, вполне применим численный метод вычисления двукратных интегралов Гаусса.

И, наконец, определение неизвестных функций – тангенциальных и нормального перемещений срединной поверхности оболочки – осуществляется по структурным формулам.

Структура решений для граничных условий:
жестко защемленного края

$$u = \omega \Phi_1, \quad v = \omega \Phi_2, \quad w = \omega^2 \Phi_3;$$

шарнирно закрепленного граничного условия

$$u = \omega \Phi_1, \quad v = \omega \Phi_2, \quad w = \omega \Phi_3 - \omega^2 (\Phi_3 (D_2 \omega + v T_2 \omega) + 2 D_1 \Phi_3) / 2$$

и т.д.

Здесь D_1, D_2, T_2 – дифференциальные операторы.

В четвертой главе «Программный комплекс для расчета магнитоупругости пластин и оболочек методом R-функций» диссертации разработан программный комплекс для расчета магнитоупругости тонких пластин и оболочек со сложной формой с использованием метода R-функций



Рис.1. Структура комплекса программных средств

На основе разработанного алгоритма и проделанного модульного анализа алгоритмов решения задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек со сложной формой разработан новый комплекс программных средств (КПС). На базе существующего КПС разработан новый комплекс программ, а его структура состоит из следующих блоков:

1. Библиотека типов и констант.
2. Библиотека модулей для R операций и картёжных операций.
3. Библиотека для определения подынтегральных выражений.
4. Библиотека для функций геометрии области (и их производных необходимого порядка).
5. Библиотека для структурных формул.
6. Библиотека для генерации точек и весов интегралов.
7. Библиотека для формирования элементов разрешающего уравнения.
8. Библиотека модулей для решения разрешающих уравнений.
9. Библиотека модулей для оформления результатов расчета.
10. Блок «Управляющая программа».

Каждый блок комплекса программ состоит из нескольких модулей, оформленных в виде процедур и функций. Из этих модулей созданы библиотеки подпрограмм. Данный КПС реализован на языке DELPHI в среде MS WINDOWS.

Разработанный КПС позволяет автоматизировать решение краевых задач магнитоупругости пластин и оболочек со сложной формой в плане для систем дифференциальных уравнений с частным производными, к которым сводятся многие задачи механики сплошных сред.

Структура и взаимодействие основных блоков КПС показана на рис. 1.

Приведена инструкция к использованию программного обеспечения.

В пятой главе «Вычислительные эксперименты по решению задач магнитоупругости тонких тел методом R-функций» диссертационной работы приводятся результаты вычислительных экспериментов по решению задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек с помощью метода R-функций.

Для обоснования достоверности приближенного решения рассмотрены задачи статики для магнитоупругих пластин, имеющих форму круга и квадрата с жестко заземленными и свободно опертыми краевыми условиями.

В таблице сравниваются значения точного (W_T) и приближенного (W_R) решений задачи методом R-функций квадратных, круглых пластин при соответствующих граничных условиях в различных точках, откуда видно, что полученные нами результаты расчета мало отличаются от результатов точного решения, а это гарантирует достаточную достоверность и применимость метода R-функций для расчета магнитоупругих пластин со сложной формой.

Таблица. Сравнительный анализ точного и приближенного решений

(x,y)		Квад. жест.заш.		Квад. шарн.заш.		Круг. жест.заш.	
X	Y	W_R	W_T	W_R	W_T	W_R	W_T
0.0	0.0	0.96787	1.0000	0.99745	1.00000	1.00002	1.00000
0.2	0.0	0.89655	0.9216	0.94895	0.95105	0.92160	0.92160
0.4	0.0	0.69533	0.7056	0.80787	0.80902	0.70561	0.70560
0.6	0.0	0.40978	0.4096	0.58741	0.58779	0.40960	0.40960
0.8	0.0	0.13136	0.1296	0.30845	0.30902	0.12961	0.12960

В диссертации рассмотрена задача изгиба магнитоупругой пластины находящейся в магнитном поле с заданным вектором напряженности магнитного поля $H(H_x, H_y, H_z)$. Уравнение состояния в безразмерных координатах данной пластины, в силу (4) имеет вид

$$k_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + k_2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + k_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + k_4 \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + k_5 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + k_6 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k_7 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + k_8 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = q, \quad (13)$$

где

$$k_1 = 1 + \frac{I(H_y^2 + H_z^2)}{4\pi D}; \quad k_2 = -2 \frac{IjH_x H_y}{4\pi D}; \quad k_3 = 2j^2 + \frac{I \cdot j^2 (H_x^2 + H_y^2 + 2H_z^2)}{4\pi D}; \quad k_4 = -2 \frac{Ij^3 H_x H_y}{4\pi D};$$

$$k_5 = j^4 + \frac{Ij^4(H_x^2 + H_z^2)}{4\pi D}; k_6 = -\frac{ha^2(H_y^2 - H_z^2)}{4\pi D}; k_7 = -\frac{4hja^2H_xH_y}{4\pi D}; k_8 = \frac{hj^2a^2(H_y^2 - H_z^2)}{4\pi D}.$$

Сперва, в качестве примера возьмем медную пластину, имеющую круглую форму с двумя круговыми вырезами и находящуюся под действием равномерно распределенной нагрузки q .

Здесь $\omega = F_1 \wedge (F_2 \wedge F_3)$. Логические функции для опорных областей F_1 , F_2 и F_3 представим в виде

$$F_1 = R^2 - x^2 - y^2 \geq 0; F_2 = (x-a)^2 + y^2 - r^2 \geq 0; F_3 = (x+a)^2 + y^2 - r^2 \geq 0,$$

где R – радиус круглой пластины, r – радиус кругового выреза пластины с центрами в точках $(a, 0)$ и $(-a, 0)$.

При расчете приняты следующие входные механические и геометрические параметры: $H_x = H_y = H_z = 10$ кЭ; ($1 \text{ Э} = 1 \text{ кэ}^{1/2}/(\text{м}^{1/2}\text{сек})$); $\rho = 8.9 \cdot 10^3$ кэ/м³ – плотность материала пластины; $h = 10^2$ м – толщина пластины; $q = \frac{a^4 Q_3}{Dh} = 1$ – нагрузка, действующая на пластину; $E = 10^{11}$ Н/м² – модуль упругости; $\nu = 0.3$ – коэффициент Пуассона; $R = 1$ м; $r = 0.2$ м; $a = 0.5$ м.

В качестве базисного полинома, входящего в структуру решения, возьмем степенной полином.

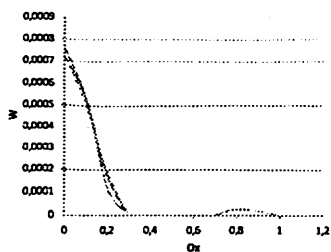


Рис. 2. Прогиб по оси Ox

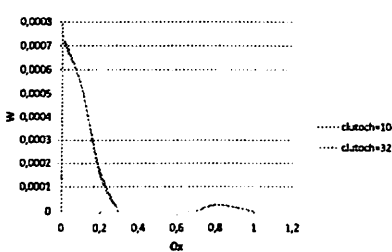


Рис. 3. Прогиб по оси Ox

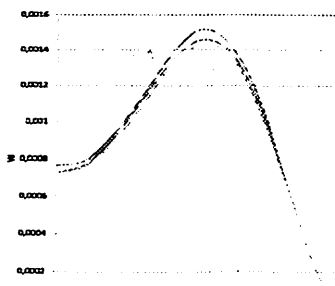


Рис. 4. Прогиб по оси Oy

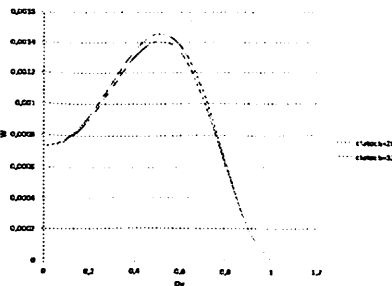


Рис. 5. Прогиб по оси Oy

На рис. 2-5 приведены графики изменения прогиба W относительно степени полинома (nk) и числа узлов Гаусса ($clutch$) по сечениям OA и OB . На рисунках 2 и 3 приведены графики изменения прогиба по сечению OA , при $clutch=20$, а nk изменяется от 2 до 4 и при $nk=3$, а $clutch$ принимает 20 и 32 соответственно. На рис. 4 и 5 при тех же значениях nk и $clutch$ – соответственно по сечению OB .

Согласно графикам, приведенным на рис. 2-5 прогиб достигает максимального значения в сечении OB при приближении к точке $x=0, y=0.5$, что следует ожидать. Значение $nk=3$ является достаточным для исследования поставленной задачи, при котором наблюдается хорошая сходимость. Следует также отметить, что с увеличением $clutch$ сходимость улучшается.

Аналогичные расчеты приведены для круглой пластины с четырьмя круговыми вырезами. Исследования проведены при тех же входных технических и геометрических параметрах, что и в первой задаче.

Также рассмотрена задача изгиба магнитоупругой пластины, имеющей форму восьмигранника, жестко защемленного по всему контуру.

Здесь $\omega = (F_1 \wedge F_2) \vee (F_3 \wedge F_4)$,

$$F_1 = a^2 - x^2 \geq 0; F_2 = a^2 - y^2 \geq 0; F_3 = b^2 - (x+y)^2 \geq 0; F_4 = b^2 - (x-y)^2 \geq 0.$$

Вычисления проводятся при значениях $a=1/\sqrt{2}$ и $b=1$.

Далее в диссертации исследовано статическое влияние электромагнитных сил, в частности, напряженности магнитного поля на напряженно-деформированное состояние, когда края пластины шарнирно-закреплены по всему контуру и имеют сложную форму.

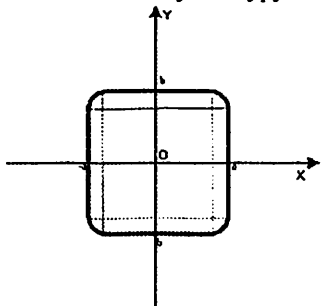


Рис. 6. Прямоугольник с округленными углами

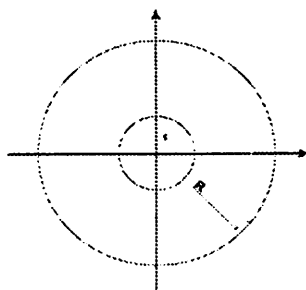


Рис. 7. Кольцевая пластина

Также рассмотрены колебания магнитоупругой тонкой прямоугольной пластины с округленными углами в постоянном магнитном поле, когда магнитное поле вычисляется из задачи магнитостатики, и кольцевой пластины со смешанными граничными условиями (жестко-защемленная по внешнему кругу и свободная по внутреннему кругу), представленные на рис. 6 и 7 соответственно.

На рис. 8 и 9 приведены графики расчетов поведения прогиба в различных точках жестко-защемленной по всему контуру пластины,

имеющей сложную форму, т.е. прямоугольной пластины с округленными углами при действии магнитного поля (*маг*) и при его отсутствии (*мех*).

Анализ результатов расчета позволяет смело утверждать о влиянии электромагнитных полей на тонкие электропроводные пластины. В частности, влияние электромагнитных сил значительно в центре пластины.

Последовательность координатных функций, удовлетворяющих смешанным граничным условиям, построенная методом R-функций в виде структуры решений, представляется в виде

$$w = \omega_1^2 \Phi_1 + \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{2(\omega_1^2 + \omega_2^2)} * \left\{ -\frac{\omega_2}{3} [D_3^{(2)} + (2-\nu)D_1^{(2)}T_2^{(2)}] \times \right. \\ \left. \times (\omega_1^2 \Phi_1 - \omega_2^2 [D_2^2(\omega_1^2 \Phi_1) + \nu T_2^2(\omega_1^2 \Phi_1)] - D_2^2(\omega_1^2 \Phi_1) - \nu T_2^2(\omega_1^2 \Phi_1)) \right\}$$

здесь $\omega_1 = \frac{R^2 - x^2 - y^2}{2R}$, $\omega_2 = \frac{r^2 - x^2 - y^2}{2r}$, $\Phi_1 = \sum_{i,j=0}^n C_{ij} \chi_i(x) \chi_j(y)$;

ω_1 – функция границы по диаметру большого круга; ω_2 – функция внутренней границе по диаметру малого круга; Φ_1 – формула разделения временной и пространственной переменных; D_i, T_i – дифференциальные операторы; R, r – соответственно радиусы большого и малого кругов.

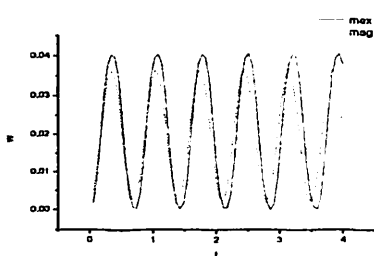
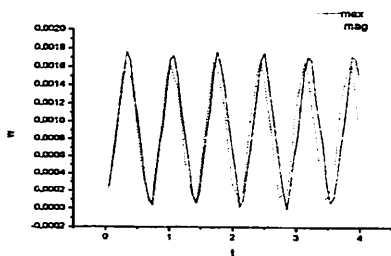


Рис. 8. Колебание пластины в точке $(-0.9, y=0)$

Рис. 9. Колебание пластины в точке $(x=0, y=0)$

Параметры: $D = 5,3 \text{ мм} = 0,53 \text{ см}$ ($R=D/2$), $d = 1,9 \text{ мм} = 0,19 \text{ см}$ ($r=d/2$),
 $h = 0,6 \text{ мм} = 0,06 \text{ см}$, $\sigma = 910 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, $E = 89 \text{ ГПа} = 89 * 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, $\rho = 8,33 * 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$,
 $G = 34 \text{ ГПа} = 34 * 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, $\nu = 0,3$, $q = 4400 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ ($q = 4400 \sin\left(\frac{\pi t}{t_n}\right) \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$).

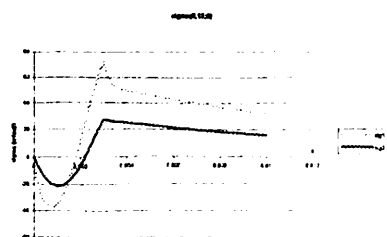
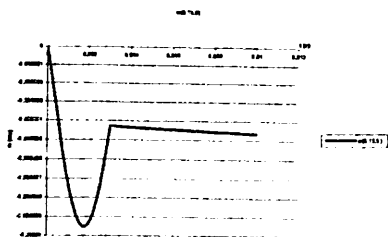


Рис. 10. Диаграмма прогиба в точке $(0.15, 0)$

Рис. 11. Диаграмма напряжений в точке $(0.15, 0)$

На рис. 10 и 11 приведены результаты расчета прогиба и напряжений в характерных точках области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по докторской диссертации «Математическое моделирование процессов влияния электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел методом R-функций» представлены следующие выводы:

1. Определены основополагающие геометрические и физические соотношения линейной теории упругости и линейной электродинамики с учетом свойства конструкции и механических характеристик материала для электропроводных тонких тел, находящихся под влиянием электромагнитных сил.

2. Разработаны новые математические модели и построены двумерные математические модели магнитоупругости тонких оболочек и пластин на основе обобщенного принципа Гамильтона-Остроградского с использованием гипотезы Кирхгофа-Лява для тонких тел с учетом линейных соотношений Коши и закона Гука теории упругости и соотношений линейной теории электродинамики, в частности уравнений Максвелла, при этом влияние электромагнитного поля определяются объемными пондеромоторными силами Лоренца, а поверхностные и контурные силы – электромагнитным тензором Максвелла.

3. Разработаны численно-аналитические методы и алгоритмы решения систем дифференциальных уравнений в частных производных с начальными-краевыми условиями, описывающих влияние электромагнитных полей на деформационное состояние тонких электропроводных тел (пластины и оболочки) сложного очертания при совместном применении вариационного метода Бубнова-Галеркина и структурного метода R-функций, и получены разрешающие уравнения (дискретные модели).

4. Сформированы структуры решений (последовательности координатных функций) для основных краевых условий задач магнитоупругих пластин и оболочек, имеющих сложную конфигурацию области (круг с двумя и четырьмя круговыми вырезами, многоугольник, прямоугольник с округленными углами и др.) методом R-функций, построены нормализованные уравнения для сложных областей тонких тел, с использованием картежных операций алгебрологической теории R-функций.

5. Разработаны векторно-матричные соотношения для дискретных моделей магнитоупругости тонких тел, сформированы соответствующие блочные матрицы демпфирования и др. при моделировании тонкостенных конструкций, определяемые системами линейных алгебраических и обыкновенными дифференциальными уравнениями с начальными условиями и численные методы решения данных систем уравнений, основанные на применении квадратурных сумм, методов Ньюмарка и исключения Гаусса.

6. На основе проведенного модульного анализа алгоритмов решения классов задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной конструктивной формы разработано программное обеспечение в виде комплекса программ для расчета магнитоупругости тонких тел методом R-функций на компьютере, состоящего из десяти основных модулей.

7. Разработаны численно-аналитические методы и обоснована достоверность полученных численных результатов расчета магнитоупругости тонких пластин для областей классической формы (квадрат, круг) путем сравнения точных и приближенных решений методом R-функций, при этом рассмотрены пластины, имеющие как жестко-защемленные, так и шарнирно-опертые краевые условия. Исследована сходимость вычислительного алгоритма расчета магнитоупругости тонких оболочек и пластин со сложной конструкционной формой относительно количества координатных функций структуры решений, построенных методом R-функций, а также относительно количества узлов (точек) при вычислении двукратных интегралов. В качестве базисного полинома выбирается степенной полином, и хорошая сходимость наблюдается при степени полинома 3-4 (что соответствует 10-15 координатных функций).

8. На основе разработанного алгоритмически-программного инструментария (комплекса программ) проведены вычислительные эксперименты по решению задач статики магнитоупругости тонких пластин для областей со сложной конфигурацией (круг с двумя и четырьмя круговыми вырезами, многоугольник сложного очертания, кольцо). Показано статическое влияние электромагнитного поля на деформационное состояние пластины с жестко-защемленными и шарнирно закрепленными краевыми условиями при заданном магнитном поле с различными значениями и направлениями напряженности магнитного поля.

9. Исследовано динамическое влияние электромагнитного поля на деформационное состояние пластины с жестко-защемленными и шарнирно закрепленными краевыми условиями на основе разработанного алгоритмически-программного комплекса и проведены вычислительные эксперименты по решению задач динамики магнитоупругости тонких тел для областей со сложной конфигурацией методом R-функций. Рассмотрены пластины постоянной толщины, изготовленные из материала с конечной электропроводностью, находящиеся во внешнем электромагнитном поле. При этом задача решается в два этапа: на первом – решается задача электростатики и определяются значения напряженности магнитного поля, на втором – решается задача магнитоупругости с использованием в ней значений магнитного поля. Определено динамическое влияние электромагнитного поля на деформационное состояние тонких тел сложной формы.

10. Полученные результаты в виде алгоритмически-программного инструментария внедрены при решении конкретных задач магнитоупругости тонких оболочек и пластин со сложной конфигурацией в рамках хоздоговора, и в рамках внедрения получена экономическая эффективность в размере 127,8 млн. сум.

**SCIENTIFIC COUNCIL 16.07.2013.T/FM.29.01 AT TASHKENT
UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES
and NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCES**

TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES

NURALIEV FAKHRIDDIN MURODILLAEVICH

**MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES OF THE
ELECTROMAGNETIC FIELDS' EFFECTS ON DEFORMATIONAL
CONDITION OF THIN ELECTRO-CONDUCTIVE BODIES BY THE
METHOD OF R-FUNCTION**

**05.01.07 - Mathematical modelling.
Numerical methods and software complexes
(technical sciences)**

ABSTRACT OF THE DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2016

The subject of doctoral dissertation has been registered on number 30.09.2014/B2014.5.T302 at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan.

Doctoral dissertation is carried out at Center of the Development of Software Products and Hardware-Software Complexes under Tashkent University of Information Technologies.

Abstract of dissertation in three languages (Uzbek, Russian, and English) is placed on web-page of Scientific council (www.tuit.uz) and Information-educational portal «ZIYONET» (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant: Nazirov Shodmankul Abdirozиковich
doctor of physical-mathematics sciences, professor

Official opponents: **Kaipbergenov Batirbek Tulepbergenovich**
doctor of technical sciences, professor

Muhamedieva Dilnoz Tulkunovna
doctor of technical sciences, professor

Narmuradov Chari Begalichev
doctor of physical-mathematics sciences, professor

Leading organization: Branch of Russian State University of Oil and Gas named I.M.Gubkin in Tashkent

Defense will take place in «12» July 2016 at 10.00 at a meeting of the scientific council 16.07.2013.T/FM.29.01 at the Tashkent University of Information Technologies and National University of Uzbekistan. (Address: 100202, Tashkent, Amir Temur str., 108. Ph.: (99871) 238-64-43; fax: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

Doctoral dissertation can be reviewed in Information-resource center of the Tashkent university of information technology (registration number 2516). Address: 100202, Tashkent, Amir Temur str., 108. Ph.: (99871) 238-65-44.

Abstract of dissertation sent out on «25» June 2016 y.
(mailing report № 1 on «25» June 2016 y.)



X.K.Aripov
Chairman of scientific council on award of scientific degree,
doctor of physical-mathematical sciences, professor

M.S.Yakubov
Scientific secretary of scientific council
on award of scientific degree,
doctor of technical sciences, professor

N.Ravshanov
Chairman of scientific seminar under scientific council
doctor of technical sciences

INTRODUCTION (Summary of the doctoral dissertation)

The topicality and significance of the subject of dissertation. Recently science has seen a rapid development of theory related fields, i.e. the mutual influence of two or more physical fields, in particular, a typical example of this direction of research is magneto-elasticity. Electromagnetic sensors are in high demand at the present time in the world, according to forecasts only for the automotive market the proceeds of their sales in 2012 amounted to 812,2 million US dollars, next 2013 year they increased by 9,5%, and in subsequent two years this indicator grew by 6-7%, and the end of 2016 it is expected that the amount of revenue will reach 1,1 billion U.S. dollars¹.

In Uzbekistan, held large-scale activities on the use of magneto-thin bodies in the technical designs and identify the influence of electromagnetic fields on the on deformation state of thin electro-conductive bodies. In this area, it is important to develop methods for determining the effects of electromagnetic fields on the deformation state of thin electro-conductive bodies of complex configuration, development of methods and algorithms for solving systems of differential equation in partial derivatives with initial-boundary conditions defining the magnetoelastic thin plates and shells of complex structural shapes, aimed at study the principles of creating magnetocumulative generators for plasma confinement devices in fusion devices, magneto-hydrodynamic accelerators of contactless magnetic poles moving systems, high-quality and long-term use of measuring equipment, operating in the area of influence of electromagnetic fields.

In world practice, focuses on process modeling effects of electromagnetic fields on the deformation state of thin electro-conductive bodies, development of mathematical models and numerical-analytical methods for solving partial differential equations derived from the initial and boundary conditions governing magnetoelasticity thin plates and shells of complex structural forms, using the method of R -functions formation of systems and structures of solutions satisfying the boundary conditions for the magnetoelastic plates and shells of complex configuration that is of particular interest from the scientific community. In this area, the implementation of targeted research are priority tasks, including scientific research in the following areas: development of numerical and analytical methods and algorithms for solving systems of differential equations in partial derivatives with initial-boundary conditions, describing the influence of electromagnetic fields on the thin electro-conductive bodies (plates, shells) of complex configuration; development of complex software tools using the method of R-functions, magnetoelasticity thin bodies of complex shape, calculation algorithms of the class of problems of magnetoelasticity thin plates and shells of complex shape; conducting computational experiments to determine the degree of influence of electromagnetic fields on thin plates and shells with complex structural form, the development of algorithms for solving problems of statics and dynamics magnetoelasticity thin bodies.

¹ <http://www.digitimes.com/>

In Uzbekistan, the modeling of the effects of electromagnetic fields on the state of deformation of thin electro-conductive bodies, theory of magnetic elasticity for the interaction of the deformation field and the electromagnetic field in a solid elastic body is aimed at the study of the principles of creating magneto-cumulative generators, devices for plasma confinement in thermonuclear facility, magneto-hydrodynamic accelerators, contactless magnetic bearing of the moving systems, measuring equipment, working in the field of action of electromagnetic fields. In various industries technical and economic reliability from the practical application of magneto-elastic sensors is characterized by the error of their component errors of 2-3%.

The thesis is directly serve the implementation of the tasks set out in the following provisions of the President of the Republic of Uzbekistan: PP-1730 of 21 March 2012 «On measures for further implementation and development of modern information and communication technologies», the PP-1442 of 15 December 2010 «On the priorities of industrial development of Uzbekistan in 2011-2015 years», and in the decree of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan №64 of 7 March 2012 «On additional measures on decreasing production expenses and reduction of production cost in industry» and also in other standard legal documents accepted to the sphere.

The use of thin electro-conductive bodies in the elements of constructions of devices and machines under the influence of electromagnetic fields in modern electronic, medical and other measuring systems, as well as in communication devices, radio engineering and computer science establishes topicality of the research problems of mutual influence of electromagnetic fields and electro-conductive thin bodies having a complex configuration by R-function method (RFM).

Relevant research priority areas of science and developing technology of the republic. Relevance of the research to priority directions of the development of science and technology of the Republic of Uzbekistan. Dissertation has been completed in accordance to priority areas of basic science and Information Technology of the Republic of Uzbekistan on the Program of Fundamental Research IV. «The development of information and information-communication technologies».

Review of international scientific researches related to the subject of dissertation². Research in the field of development of mathematical models influence of electromagnetic fields on the deformation state of the conductive thin plates and shells, analytical and numerical methods of solution, computational algorithms, software tools are carried out in cutting-edge companies, research centers and educational institutions by scientists of Company Fluke, Allegro Microsystems, Purdue University (USA), Cargo Care Solutions, University of Bonn (Germany), Hefei University of Technology, Shanghai Jiaotong University

² Review of foreign scientific research on the topic of the thesis is based on the <http://www.ericz.com/>, <http://docs.lib.purdue.edu/>, <http://www.cargocaresolutions.com/>, <http://www.sciencedirect.com/>, <http://link.springer.com/>, <http://www.iccm-central.org/>, <http://www.university-directory.eu>, <http://www.digitimes.com/>, <https://www.ihs.com/> and other sources.

(China), Seoul National University (South Korea), Yamaha and Alps Electric, Asahi Kasei Microsystems (Japan), National Technical University of Athens (Greece), Micronas (Switzerland), Melexis (Belgium), public company Elektroapparat, Moscow State University (Russia), public company Elektroizmeritel, Kiev National University (Ukraine), state unitary enterprise "Science and Progress" (Uzbekistan).

Among the companies on the development of magneto-elastic sensors is headed by Asahi Kasei Microsystems (Japan) thanks to electronic compasses for mobile phones and tablets, as well as Allegro Microsystems (USA), Infineon Technologies (Germany), Micronas (Switzerland), (Melexis) (Belgium), NXP (Netherlands), Yamaha and Alps Electric (Japan), AMS (USA and Austria) and Diodes (U.S.) took the leading positions.

The effects of coupling mechanical, electromagnetic and temperature fields in the framework of linear relations were defined in the works of scientists. The use of Maxwell's equations based on physical principles defined variational equations of the magneto-elasticity theory of thin plates and offered the method of interpolation matrices of solutions (Hefei University of Technology, Shanghai Jiaotong University, China). Mathematical models of electro-elastic plates and shells was built and surface waves of Rayleigh and Lamb in magneto-elastic media (National Technik University of Athens, Greece) were studied with the help of mathematical methods based on the Kirchhoff-Law hypotheses and electromagnetic fields. Scientists at Seoul National University determined the particular model of electro-magneto-elastic piezo-magnetic and piezoelectric plates (Seoul National University, South Korea). The wide use of thin magneto-elastic bodies in various industries (Eriez Manufacturing Co, Fluke, USA, Cargo Care Solutions, Germany) was also determined on the justification from the scientific point of view and analysis of practical application.

In the world of research carried out on some of priority areas for the development of mathematical models electromagnetoelasticity piezo-electric and electro-conductive bodies, construction of linear and nonlinear models, including: development of hypotheses electro-magneto-elasticity of thin shells and plates; development of methods and computational algorithms for solving problems magnetoelasticity thin plates and shells in linear and non-linear problems, carried out computing experiments for determining the degree of influence of electromagnetic fields on the deformation state of thin plates and shells of complex structural forms, providing a solution problems of statics and dynamics of magneto-elasticity of thin bodies by the method of the R-function.

Level of the study the problem. Mathematical modeling of the effects of electromagnetic fields on the deformation state of thin electro-conductive bodies, the study of magneto-elasticity of thin plates and shells with complex structural forms, the formation of systems and structures of solutions satisfying the boundary conditions at the complex configuration magnetoelastic plates and shells by the method of R-function, solving systems of differential equations describing magnetoelastic thin plates and shells with complex structural forms, sample the spatial variables and the construction of discrete models magnetoelasticity thin

bodies, development electro-magneto-elasticity problem solving methods of thin bodies on the basis of vector-matrix methods solution dedicated to research and development of foreign and national scientists, such as like S.Kaliski, K.Hiroyuki (Hefei University of Technology), J.Tani (Shanghai Jiaotong University), D.Georg, Z.B.Kuang (Seoul National University), D.Hasanyan, D.I.Bardzokas (National Technik University of Athena), S.A.Ambartsumyan, G.E. Bagdasaryan, M.V.Belubekyan, V.L.Rvachev, L.V.Kurpa, L.V.Molchenko, (Kyiv National University), I.T.Selezov, M.R.Korotkina (Moscow State University), H.A.Rakhmatulin, V.K.Kabulov, Sh.A.Nazirov, T.Yuldashev, R.Indiaminov and other authors.

The works of scientists such as S.Kaliski, K.Hiroyuki, J.Tani, D.Georg, L.V.Molchenko, R.Indiaminov, M.R.Korotkina were devoted to the construction of mathematical models of electro-magneto-elastic thin plates and shells. Z.B.Kuang, D.Hasanyan devoted their work to the study of linear equations of magneto-thermo-power electro-elastic plates and shells. D.I.Bardzokas, I.T.Selezov, S.A.Ambartsumyan, G.E.Bagdasaryan, M.V.Belubekyan studied the hypothesis of electro-magneto-elastic, V.L.Rvachev, L.V.Kurpa, Sh.A.Nazirov developed the R-functions method and the works of H.A.Rakhmatulina, V.K.Kabulov, T.Yuldashev were devoted to the study of linear and nonlinear equations of magneto-elasticity of plates and shells.

Almost all of the researches in the field of electricity and magnetoelasticity reduced to consider the thin bodies, shells (plates) with classic, simple design geometric configurations area with private boundary conditions. Consideration of a wide class of problems magnetoelasticity thin bodies, are described by the general mathematical models with natural boundary conditions, which have a complex structural geometric configuration area using the theory of mathematical modeling and algorithmization, modern computer tools currently insufficiently conducted scientific research.

Connection of the dissertation with the plans of scientific-research works is reflected in following projects. The research of this dissertation are reflected in the projects of the Center of software products and hardware-software complexes under Tashkent University of information technologies: F-1.2.4. «Problem class solutions algorithmization of environment and fields interaction» (2003-2007), FA-F1-F009. «Development of a metalinguistic theory of algorithmization and its application to the automation of constructing solutions of multidimensional problems of mathematical physics» (2007-1011.), F4-FA-F005. «Research and Development of algorithmic methods for solving classes of multidimensional nonlinear problems of mathematical physics for regions of complex configuration» (2012-1016.), F5-016. «Development of methods and means for solving problems of multidimensional optimization in linear and nonlinear formulation on the basis of R-functions method design» (2012-1016.).

The purpose of research is to develop algorithms and software tools of mathematical modeling of electromagnetic fields influence on the deformation state of the thin electro-conductive bodies of complex configuration using the R-functions and numerical-analytical methods.

Tasks of research work:

determination of fundamental geometrical and physical relations of the linear theory of elasticity and linear electrodynamics based on the properties of structure and mechanical properties of the material for electro-conductive thin bodies under the influence of electromagnetic forces and the construction of mathematical models of magnetic elasticity of thin plates and shells;

development of numerical-analytical methods of solving systems of differential equations in partial differentiation with initial-boundary conditions, defining the mathematical model of magnetic elasticity of thin plates and shells with complex structural forms on the basis of variational methods using the R-functions theory;

the formation of structure and systems of solutions to the basic boundary value problem of magneto-elastic plates and shells having complex configuration of the R-functions method;

development of computational algorithms for solving systems of allowing equations of magneto-elasticity thin plates and shells of complex shape, which includes the discretization by spatial variables and construction of discrete patterns of magnetic elasticity of thin bodies;

development of algorithms for solving classes of problems magneto-elasticity thin plates and shells of complex structural form based on vector-matrix of numerical methods and the development of software in the form of complex programs;

justification of the obtained numerical calculation results reliability by the R-functions method and the adequacy of mathematical models of magnetic elasticity of thin plates and shells;

conduction of computational experiments to investigate the effects of electromagnetic fields on deformation state of thin plates and shells with complex structural forms and the solution of problems of statics and dynamics of magnetic elasticity of thin bodies by R-functions method.

Objectives of the research is degree of cover the magnetoelasticity of thin bodies (plates and shells) with complex structural configuration.

Subject of the research is mathematical models, numerical and analytical algorithms and algorithmic-software to study the effects of electromagnetic fields on the deformation state of thin electro-conductive bodies with a complex structural shape by R-functions method.

Methods of the research. The study used mathematical and numerical modeling, the laws of electrodynamics, variational principles, computational mathematics, methodologies of algorithmization, technology of modelar and structured programming and methods of the computational experiment

Scientific novelty of dissertational research consists in the following:

a mathematical model describing the processes of influence of electromagnetic fields on the deformation state of thin electro-conductive bodies is built on the basis of the generalized variational Hamilton-Ostrogradsky principle with the terms of the linear theory of elasticity and Lorentz electromagnetic forces,

the mathematical model of magnetic elasticity of thin plates and shells is constructed;

qualitative numerical-analytical methods and algorithms for solving systems of differential equations with initial-boundary conditions describing the effect of electromagnetic fields on electro-conductive thin bodies (plates and shells) with a complex structural shape of the joint application of the variational Bubnov-Galerkin method and the structural R-functions method is developed;

solutions structures and systems to practical boundary conditions at rigid-clamped, hinged-simply supported edge magnetoelastic plates and shells with complex configuration (with cuts) is formed;

complex software for calculation of magneto-elasticity of thin plates and shells is developed on conducted algorithms for solving problem classes of thin plates and shells magneto-elasticity with complex structural form;

the convergence of the computational algorithm concerning the number of coordinate functions of the solutions structure is shown, the practical applicability of the method and the reliability of the obtained numerical calculation results of magnetic elasticity of thin bodies by comparing with the exact solutions is proved;

the algorithms for carrying out computational experiments to study the static and dynamic effects of electromagnetic fields on the deformation state of the thin perfectly conducting bodies with complex structural form is developed.

Practical results of the research consist in the following:

a mathematical model of magnetic elasticity of thin plates and membranes defining the influence of electromagnetic fields on a thin conductive body having a geometrically complex structural configuration is built calculation of which allows to increase the quality of electronic devices;

analytical and numerical methods and the algorithmic and software toolset based on the structural R-functions method, allowing to carry out series of computational experiments on the solution of practical problems of magnetic elasticity of thin plates and shells with complex structural forms is developed;

new methods of mathematical simulation of stress-strain state of magneto-elastic plates and shells allow to evaluate the influence of electromagnetic fields on a thin conductive body having a geometrically complex configuration by 10-12%, and for some practical cases more.

Reliability of obtained results of the study is substantiated by the correctness of the formulation of the problem based on Hamilton-Ostrogradsky variational principle, rigor of mathematical calculations, using of reasonable methods of solutions, convergence analysis of computational algorithms and also by comparing the obtained approximate solutions with the exact solutions in an analogous statement on base using combined methods Bubnov-Galerkin and R-function.

Science and practical value of results of the research. Improvement and development of existing generic methodologies of the research by the algorithmic method, mathematical modeling, the creation of a universal computational algorithms based on numerical-analytic techniques such as variational method and structural method based on R-functions theory as well as algorithmic and software

tools allows to automate a wide range of new tasks in the field of magnetic elasticity of thin plates and shells with complex structural configuration of the field.

The practical significance of the work lies in the fact that the obtained results will allow to improve the quality and accelerate the pre-calculations of structures, which are based on thin elastic bodies, in particular, plates and shells with complex constructional form in plan, located in the electromagnetic field and the application of magneto-elastic sensors showed a key role in vehicle safety systems required by the normative documents of the system of electronic stability control designed to prevent skidding of the vehicle, relatively expensive sensors steering angle.

Realization of the research results. The results obtained in the form of mathematical models, developed a computational algorithm based on the combination of Bubnov-Galerkin variational method and the structural R-functions method and set of software tools used within the contract № 22/08 at «SRI Algorithm-inginiring», which directly applied scientific and technical solutions proposed in the dissertation (certificate No. 24-8/2475 the Ministry for development of information technologies and communications of the Republic of Uzbekistan dated 22 June 2015). Application of scientific results helped automate the process of assessing the impact of electromagnetic fields on the state of deformation of thin electro-conductive bodies of complex geometric configuration using the method of R-functions and algorithms of mathematical modeling.

Approbation of the work. Scientific and practical results of the dissertation are tested in international and national seminars and conferences: "Modern problems of mathematical physics and information technologies" (Tashkent, 2005); "Contemporary problems and prospects of mechanics" (Tashkent, 2006); "2006 ICI" (Tashkent, 2006); "Actual problems of applied mathematics and mechanics" (Kharkiv, 2006); "Actual problems of continuum mechanics and strength of structures" (Kiev, 2007); "Modern problems of mathematical modeling and computer technologies" (Krasnoyarsk, 2008); "New mathematical models in continuum mechanics: construction and investigation" (Novosibirsk, 2009); DSMSI-2009 (Kiev, 2009); "Propagation of elastoplastic waves" (Bishkek, 2009); "Contemporary problems of mechanics" (Tashkent, 2009); "XIII international scientific conference named after academician M. Kravchuk" (Kyiv, 2010); AICT2010 (Tashkent, 2010); ND-KhPI (Sevastopol, 2013); "KHU-TUIT International Conference for ICT & Knowledge Economy" (Tashkent, 2014); "International scientific and practical conference" (Dubai, 2015); "Modern state and prospects of development of information technologies" (Tashkent, 2011); "Information technology and telecommunications problems" (Tashkent, 2013).

Publication of the results. According to the thesis topic published 52 scientific papers, including 9 papers in national journals and 4 articles in international journals of recommended scientific editions for publication of basic scientific results of doctoral dissertations by Supreme attestation commission of the Republic of Uzbekistan.

Structure and volume of dissertation. The structure of the dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, references and appendices. The volume of the dissertation is 182 pages.

THE MAIN CONTENTS OF DISSERTATION

In the **introduction** the urgency and relevance of the study, the purpose and objectives of the study, characterized by the object and the subject, research indicated the priority areas of science and technology of the republic, outlines the scientific novelty and practical results of the study revealed the scientific and practical significance of the results, implementation of the results research, information on published works and the dissertation structure.

In the first chapter "**Analysis of the modern state of influence of electromagnetic fields on electroconducting thin bodies**" the current state of the research effect of electromagnetic fields on the conductive thin body is analyzed, development trends and modern methods of determining the effect of electromagnetic fields on the conductive thin body is studied and the formalization of the problem of mathematical modeling influence of electromagnetic forces on electrically conductive thin bodies with complex shapes using R-functions is given.

The first work in the field of magnetoelasticity was the work of L.Knopoff, where using a simplified model showed that the magnetoelastic effect on the distribution of elastic waves in the magnetic field of the earth, play only a minor role.

Works of Polish scientists were essential for the development of magneto-elasticity of thin bodies. They solved a number of different problems and questions of interaction of electromagnetic fields with elastic as well as plastically deformable bodies. In particular, magneto-elastic vibrations perfectly conducting plate and rod in a magnetic field was investigated by them.

An equation of transverse vibrations of the plate containing terms of electromagnetic origin was obtained in the joint consideration of the Maxwell equations in vacuum and the equations of motion of the plate (rod). Solving this equation, the mechanical properties of the plate and the characteristics of the electromagnetic field are determined, as the body of the plate, and the environment in which the plate vibrates.

The problem of periodic forced oscillations of an infinite plate is considered. They also considered the problem of magneto-elasticity of planar resonant oscillations perfectly conducting plates in a magnetic field, which shows that the amplitude of oscillation of the plate remains limited in the magnetic field due to the emission of electromagnetic waves into the surrounding medium plate.

Russian scientists investigated the effect of magnetic field on the static and dynamic stability of thin elastic shallow of cylindrical panel, concised and streamlined along the generator from outside with the supersonic flow of a compressible in viscid weakly conducting gas with unperturbed velocity directed parallel fashion. The problem is solved in a geometrically nonlinear formulation using the Bubnov-Galerkin method. It has been shown that increasing the strength of the magnetic field reduces the lower critical effort, but a substantial increase in the critical flutter speed.

Further the propagation of waves in the conductive elastic media in an electromagnetic field is investigated in the work of Russian scientists. The

qualitative and quantitative assessment of the impact of the effects of coupled magnetoelastic interactions were obtained from the analysis of the solutions of new problems of a transient and traveling magnetoelastic waves, and the scattering of magnetoacoustic waves.

Increasing of the electrical conductivity of the medium and the strength of the external magnetic field reduces the intensity of the scattered fields and changes the location of the zeros and extremum in the radiation pattern. The solution of the inverse problem of scattering of electromagnetic waves by inhomogeneous anisotropic plasma is built and the uniqueness of solutions is proved. The influence of the magnetic field and the boundary layer on a flutter is also investigated. The mathematical formulation of the problem for the dielectric plate, streamlined weakly conducting medium was considered, the stability equations were derived and numerical analyses were performed.

Qualitatively different areas of parameters were detected, where the influence of the magnetic field on the stability can manifest itself both a stabilizing and destabilizing one.

It is shown that the real magnetic field can significantly affect the critical flutter speed. The nonlinear flutter based on solving the problem of flow around a cylinder with a perturbed surface and on the differential equations of geometrically nonlinear shell theory is also considered. The static and dynamic stability of a square cylindrical panel is investigated by Bubnov method (binomial approximation). The influence of magneto-hydrodynamic effects on the critical effort is estimated.

The Ukraine scientists suggest in their works, that the normal to the middle surface of the plate element can be deformed by changing its length in problems of electro-magneto-elasticity. It is shown, that the deformation inhomogeneity causes the redistribution of free electricity. The electric charges are concentrated in the most stressed areas. Allowance for change in length of the normal element significantly affects the change of electric potential of the plate.

In particular cases, when the material of the plate or shell perfectly conducting or infinitely extending plate has a finite conductivity, the problem of magnetoelasticity is solved relatively simply.

In general, when a plate or shell has finite dimensions and it is finitely conducting material, the solution of the problem becomes complicated enough.

Famous researchers in the field of magnetoelasticity of Armenian school formulated the magnetoelasticity hypothesis of thin bodies of finite size and finite conductivity interpreting peculiarly the method of joint asymptotic integration of three-dimensional equations of electrodynamics and elasticity theory.

Objective of fluctuations of conductive isotropic plate in an external magnetic field is reduced to the joint solution of differential equations system for the inner area of the magneto plate and the equations of electrodynamics in the outer area.

The proposed method was applied to solve various problems of magneto-elasticity of plates of finite dimensions, made of finite conductivity material in a magnetic field.

Further papers discuss the main regulations of the magnetoelasticity of thin bodies such as shells and plates. They are considered both general questions of theory and solution of numerous problems that are of great interest from the point of view of applications.

In particular, questions of oscillation and stability of different types of shells and plates made of a material with finite conductivity are investigated. The problem of flutter of isotropic and anisotropic shells and plates, streamlined conductive liquid or gas are considered, issues of oscillations and stability of current-carrying plates and shells are explored.

The hypothesis of magneto-elasticity of thin bodies is formulated on the base of the obtained results of analysis with the exact solution of some special problems of magneto-elasticity and consideration of general asymptotic solutions of three-dimensional equations in case of magnetoelasticity of shells and plates. This hypothesis allows to construct a general theory of magneto-elasticity thin shells and plates and specify the effective solutions of many applications.

The exact solution of some problems that are simultaneously used to assess the accuracy of the proposed application of the theory are also given.

The oscillations and stability of elastic systems in an external magnetic field have studied in joint works of Russian, Ukrainian and Uzbek scientists. The frequency of natural oscillations of small rectangular plates, rods and circular cylindrical shells in an external magnetic field were determined, the critical values of the magnetic field, limiting the region of existence of periodic motions were found.

The parametric resonance of plates and a circular cylinder in an alternating magnetic field was considered. The nonlinear problem of plate bending and membrane connected with the account of its uncoiled middle surface was solved. Magnetoelasticity of circular cylindrical shell in the longitudinal magnetic field is equated and the elastic vibrations of the rotating cylinder and an elastic ring in its plane based portable and kariolisov' forces of inertia and moment distributions of electromagnetic forces are examined.

Gyromagnetic effect of strain origin in the ring and the cylinder is marked. The motion of an elastic body, associated with the gyroscope is investigated. The torsional oscillations of an elastic chain system with distributed mass, the rod with the masses at the ends and a gyroscope, the stability of the electromechanical system as a system with an infinite number of degrees of freedom in the presence of gyroscopic forces, torsional vibrations in an external magnetic field of an elastic rod (shaft) are considered as an element of the gyroscopic system.

Piezoelectric is also investigated, problems of existence and propagation of surface waves in piezoceramics polarized in thickness are considered, questions related to radial- transverse oscillations of piezoceramic disks are discussed.

A review of research in the field of magnetoelasticity, electroelasticity and electromagnetoelasticity of thin plates and shells, as well as methods for their solutions over the last 15-20 years give the reason to believe that the study of mathematical modeling method's impact of electromagnetic fields on thin

conductive body remains unsolved and in demand issue which is of great scientific and technical value.

The second chapter «Mathematical modelling of processes of influence of electromagnetic fields on deformation condition of the thin electroconducting bodies» of the dissertation is devoted to the principles of mathematical modeling and development of methods of mathematical modeling process of the impact of electromagnetic fields on thin conductive body (plates and shells).

Here, the basic equations of the theory of elasticity of thin plates and shells are derived from Hamilton variational principle. Geometric Cauchy relations and physical relationships in the reverse form of Hooke's law, and the law of change of displacement are used in the construction of specific models. The rectangular coordinate system is used in the derivation of the equations.

The Hamilton variational principle is written as following:

$$\delta \int (T - \Pi + A) dt = 0. \quad (1)$$

where: T - kinetic and P - potential energy; A - the work of external forces.

Membranes theory (wafers) is based on geometric hypothesis according to that the normal to the surface of the middle straight shell element after deformation remains straight, normal to this surface in its deformed state and retain its length. This hypothesis (Kirchhoff-Love) admits that the deformation of the shell occurs without shear deformation and in planes normal sections and without deformation elongation of the shell thickness. The most common simplified equations are the so-called equations of the theory of Mustary-Donnell-Vlasov shells, based on some additional assumptions in the technical theory of shells. Shallow shell is a shell having a slight rise compared with the characteristic dimensions of the middle surface of the shell.

In particular, rolling refers to the shell having in plan the form of a rectangle with the maximum boom raising of not more than 1/5 of the smallest side of the rectangle in the monograph by V.Z.Vlasov. Shells with slightly curved plate also belong to this category. For shallow shells of the internal geometry of the middle surface is identified with the Euclidean plane geometry. The simplest form of the equilibrium equation is represented in Cartesian coordinates.

Analytically, Kirchhoff-Love hypotheses can be written as:

$$\begin{aligned} u_1 &= (1 + k_1 z)u - z \frac{\partial w}{\partial x}, \\ u_2 &= (1 + k_2 z)v - z \frac{\partial w}{\partial y}, \\ u_3 &= w. \end{aligned} \quad (2)$$

where u_1 , u_2 , u_3 – displacement in an arbitrary point of the shell (plate); u , v , w - displacement of the middle surface of the shell (plate); k_1 k_2 - the principal curvatures of the middle surface; $k_1 = 1/R_1$, $k_2 = 1/R_2$, are R_1 , R_2 - are the principal radii of curvature. In the case of plates $k_1 = k_2 = 0$.

Taking into account the force of electromagnetic origin variations of the work the following is defined:

$$\begin{aligned}
\int \delta A dt = & \int \int \int_V [(X + \rho K_x) \delta u_1 + (Y + \rho K_y) \delta u_2 + (Z + \rho K_z) \delta u_3] dV dt + \\
& + \int \int \int_V [(q_x + T_{xx}) \delta u_1 + (q_y + T_{yy}) \delta u_2 + (q_z + T_{zz}) \delta u_3] \Big|_z dx dy dt + \\
& + \int \int \int_V [(P_x + T_{xx}) \delta u_1 + (P_y + T_{yy}) \delta u_2 + (P_z + T_{zz}) \delta u_3] \Big|_x dz dy dt + \\
& + \int \int \int_V [(F_x + T_{yx}) \delta u_1 + (F_y + T_{xy}) \delta u_2 + (F_z + T_{zx}) \delta u_3] \Big|_y dz dx dt, \quad (3)
\end{aligned}$$

where $X, Y, Z, \rho K_x, \rho K_y, \rho K_z$ – components of volume force; $q_x = q_x^+ + q_x^-$, $q_y = q_y^+ + q_y^-$, $q_z = q_z^+ + q_z^-$, $T_{xx} = T_{xx}^+ + T_{xx}^-$, $T_{yy} = T_{yy}^+ + T_{yy}^-$, $T_{zz} = T_{zz}^+ + T_{zz}^-$ – components of shallow force; $P_x, P_y, P_z, T_{xy}, T_{yx}, T_{xz}, T_{zx}, F_x, F_y, F_z, T_{yx}, T_{xy}, T_{yz}$ – components of boundary force.

Putting into (3) variations work of external force according to displacement from (2) and performing appropriate operation, in particular, integration, integration in parts, bringing similar members, also replacing of expressions, we obtain:

$$\begin{aligned}
\int \delta A dt = & \int \int \int_V [(N_x + R_x + k_1 M_x + k_1 M_{ix} + q_x + T_{xx} + k_1 q_x (\frac{h}{2}) + k_1 q_x (-\frac{h}{2}) + \\
& + k_1 T_{xx} (\frac{h}{2}) + k_1 T_{xx} (-\frac{h}{2})) \delta u + (N_y + R_y + k_2 M_y + k_2 M_{iy} + q_y + T_{yy} + k_2 q_y (\frac{h}{2}) + k_2 q_y (-\frac{h}{2}) + \\
& + k_2 T_{yy} (\frac{h}{2}) + k_2 T_{yy} (-\frac{h}{2})) \delta v + (N_z + R_z + q_z + T_{zz} - \frac{\partial}{\partial x} M_x - \frac{\partial}{\partial x} M_{ix} - \frac{\partial}{\partial y} M_y - \frac{\partial}{\partial y} M_{iy} + \\
& + \frac{\partial}{\partial x} (q_x (\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial x} (q_x (-\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} (\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} (-\frac{h}{2})) + \\
& + \frac{\partial}{\partial y} (q_y (\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial y} (q_y (-\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} (\frac{h}{2})) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} (-\frac{h}{2})))] \delta w \Big] dx dy dt + \\
& + \int \int_V [(N_{ix} + N_{ix} + k_1 M_{ix} + k_1 M_{ix}) \delta u + (N_{iy} + N_{iy} + k_2 M_{iy} + k_2 M_{iy}) \delta v + \\
& + (N_{iz} + N_{iz} + \frac{\partial}{\partial y} M_{ix} + \frac{\partial}{\partial y} M_{ix} - q_x (\frac{h}{2}) - q_x (-\frac{h}{2}) - T_{xx} (\frac{h}{2}) - T_{xx} (-\frac{h}{2}) - \\
& - q_x (\frac{h}{2}) - q_x (-\frac{h}{2}) - T_{yx} (\frac{h}{2}) - T_{yx} (-\frac{h}{2})] \delta w \Big] dx dy dt + \\
& + \int \int_V [(N_{ix} + N_{ix} + k_2 M_{ix} + k_2 M_{ix}) \delta u + (N_{iy} + N_{iy} + k_2 M_{iy} + k_2 M_{iy}) \delta v + \\
& + (N_{iz} + N_{iz} + \frac{\partial}{\partial x} M_{iy} + \frac{\partial}{\partial x} M_{iy} - q_y (\frac{h}{2}) - q_y (-\frac{h}{2}) - T_{yy} (\frac{h}{2}) - T_{yy} (-\frac{h}{2}) - \\
& - q_y (\frac{h}{2}) - q_y (-\frac{h}{2}) - T_{zx} (\frac{h}{2}) - T_{zx} (-\frac{h}{2})] \delta w \Big] dx dy dt - \\
& - \int \int_V [M_{ix} + M_{ix} + M_{iy} + M_{iy} + M_{ix} + M_{ix} + M_{iy} + M_{iy}] \delta w \Big|_x \Big|_y dt.
\end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned}
N_x &= \int_z X dz, \quad N_y = \int_z Y dz, \quad Q_z = \int_z Z dz, \quad M_x = \int_z zX dz, \quad M_y = \int_z zY dz, \\
R_x &= \int_z \rho K_x dz, \quad R_y = \int_z \rho K_y dz, \quad R_z = \int_z \rho K_z dz, \quad M_{Rx} = \int_z z\rho K_x dz, \quad M_{Ry} = \int_z z\rho K_y dz, \\
N_{Fx} &= \int_z P_x dz, \quad N_{Fy} = \int_z P_y dz, \quad Q_{Fz} = \int_z P_z dz, \quad M_{Fx} = \int_z zP_x dz, \quad M_{Fy} = \int_z zP_y dz, \\
N_{Tx} &= \int_z T_{xz} dz, \quad N_{Ty} = \int_z T_{yz} dz, \quad Q_{Tz} = \int_z T_{zz} dz, \\
M_{Tx} &= \int_z zT_{xz} dz, \quad M_{Ty} = \int_z zT_{yz} dz, \quad M_{Tz} = \int_z zT_{zz} dz, \\
N_{Fx} &= \int_z F_x dz, \quad N_{Fy} = \int_z F_y dz, \quad Q_{Fz} = \int_z F_z dz, \quad M_{Fx} = \int_z zF_x dz, \quad M_{Fy} = \int_z zF_y dz, \\
N_{Tx} &= \int_z T_{xz} dz, \quad N_{Ty} = \int_z T_{yz} dz, \quad Q_{Tz} = \int_z T_{zz} dz, \\
M_{Tx} &= \int_z zT_{xz} dz, \quad M_{Ty} = \int_z zT_{yz} dz, \quad M_{Tz} = \int_z zT_{zz} dz, \\
M_{q_x}^+ &= q_x \left(\frac{h}{2}\right), \quad M_{q_x}^- = q_x \left(-\frac{h}{2}\right), \quad M_{q_y}^+ = q_y \left(\frac{h}{2}\right), \quad M_{q_y}^- = q_y \left(-\frac{h}{2}\right), \\
M_{T_{xz}}^+ &= T_{xz} \left(\frac{h}{2}\right), \quad M_{T_{xz}}^- = T_{xz} \left(-\frac{h}{2}\right), \quad M_{T_{yz}}^+ = T_{yz} \left(\frac{h}{2}\right), \quad M_{T_{yz}}^- = T_{yz} \left(-\frac{h}{2}\right),
\end{aligned}$$

Then obtained expressions of kinetic variations, potential energy and work of external force is put into Hamilton variation principle (1). Obtained variation equation exists in any value of V volume. That's why, force of arbitrariness of V area, we obtain the equation of motion and natural initial and boundary conditions of shells:

$$\begin{aligned}
-\rho h \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{\partial N_{12}}{\partial y} + (k_1 - k_2) \frac{\partial M_{12}}{\partial y} + N_x + R_x + q_x + T_{xz} &= 0, \\
-\rho h \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \frac{\partial N_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_{22}}{\partial y} - (k_1 - k_2) \frac{\partial M_{12}}{\partial x} + N_y + R_y + q_y + T_{yz} &= 0, \\
-\rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 M_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{22}}{\partial y^2} + k_1 N_{11} + k_2 N_{22} - k_1^2 M_{11} - k_2^2 M_{22} + Q_z + R_z - \frac{\partial}{\partial x} (M_x + M_{Rx}) - \\
-\frac{\partial}{\partial y} (M_y + M_{Ry}) + q_z + T_{zz} + \frac{\partial}{\partial x} (M_{q_x}^+ + M_{q_x}^- + M_{T_{xz}}^+ + M_{T_{xz}}^-) + \frac{\partial}{\partial y} (M_{q_y}^+ + M_{q_y}^- + M_{T_{yz}}^+ + M_{T_{yz}}^-) &= 0,
\end{aligned} \tag{4}$$

in this case some members of equation, in particular, rejected into the force of their insignificant impact.

Natural boundary conditions are following:

$$\begin{aligned}
(-N_{11} + N_{Fx} + N_{Tx}) \delta U|_x &= 0, \quad (-N_{12} + N_{Fy} + N_{Ty}) \delta V|_x = 0, \\
\left(-\frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial t} - \frac{\partial M_{11}}{\partial x} - \frac{\partial M_{12}}{\partial y} + Q_{Fz} + Q_{Tz} - M_{q_x}^- - M_{q_x}^+ - M_{T_{xz}}^+ - M_{T_{xz}}^-\right) \delta W|_x &= 0, \\
(M_{11} - M_{Fx} - M_{Tx}) \delta \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_x &= 0, \quad (-M_{12} - M_{Fy} - M_{Ty}) \delta \frac{\partial W}{\partial y} \Big|_x = 0, \\
(-N_{12} + N_{Fx} + N_{Tx}) \delta U|_y &= 0, \quad (-N_{22} + N_{Fy} + N_{Ty}) \delta V|_y = 0, \\
\left(-\frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial x} - \frac{\partial M_{12}}{\partial x} - \frac{\partial M_{22}}{\partial y} + Q_{Fz} + Q_{Tz} - M_{q_y}^+ - M_{q_y}^- - M_{T_{yz}}^+ - M_{T_{yz}}^-\right) \delta W|_y &= 0,
\end{aligned} \tag{5}$$

$$(M_{12} - M_{F_x} - M_{T_{yx}}) \delta \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_y = 0, \quad (M_{22} - M_{F_y} - M_{T_{yy}}) \delta \frac{\partial W}{\partial y} \Big|_y = 0,$$

Thus, (4) there is an equation of motion and (5) boundary conditions, applied to very depressed shell obtained on the base of Hamilton variation principle in application of Kirhgow-Law hypotheses.

In such formulation of volume force of electromagnetic origin, added to full volume force, is represented in the view:

$$f = \rho \mathcal{K} = \frac{1}{4\pi} (\text{rot}(\text{rot}(\mathbf{U} \times \mathbf{H}))) \times \mathbf{H}, \quad (6)$$

where $U(u_1, u_2, u_3)$ – vector displacement; $H(H_x, H_y, H_z)$ – vector of stress of magnetic field.

To full surface and boundary forces are added electrodynamic tensors of Maxwell stress:

$$T_{ik} = \frac{1}{4\pi} [H_i h_k + h_i H_k] - \frac{\sigma_{ik}}{4\pi} \bar{h} \bar{H}, \quad T_{ik}^e = \frac{1}{4\mu\pi} [H_i^e h_k^e + h_i^e H_k^e] - \frac{\sigma_{ik}^e}{4\pi} \bar{h}^e \bar{H}^e, \quad (7)$$

where $\sigma_{ik} = \begin{cases} 0, & i \neq k, \\ 1, & i = k. \end{cases}$

Relations (4) and (5) with (6) and (7) determine the mathematical model of magnetoelastic thin plates and shells.

Further, the issues of algorithmic in magnetoelastic thin plates and shells with complex shape are considered.

The third chapter «**Methods of the solution of boundary-value problems of magnetoelasticity of thin bodies by R-function method**» is devoted to the methods of solution boundary value problems of magnetoelasticity of thin bodies using R-function method.

To solve the problem of magneto-elastic vibrations of thin plates and shallow shells are applied the variational Bubnov-Galerkin method.

As is well known in this solution process task consists of the following stages:

- construction of sequencing coordinate functions (solution structures) that satisfy the given boundary conditions;
- discretization of the space variables, the construction of governing equations, i.e., construction of a discrete model;
- decision resolving equations and finding the unknown component structure solutions;
- identification of unknown functions, in our case, the tangential and normal displacements of the middle surface of the shell.

At the first stage in the construction of the sequence of coordinate functions that satisfy the given boundary conditions, a structural R-functions method of V.L.Rvachev is used. Note that the structural R-function method (RFM) builds a sequence of coordinate functions in the form of the structure of solutions satisfying the boundary conditions at almost any complex configuration contour of shells in the plan.

In general, the structure of the solutions constructed by RFM can be represented as form:

$$u = u(\omega, \Phi_1), \quad v = v(\omega, \Phi_2), \quad w = w(\omega, \Phi_3), \quad (8)$$

Where:

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^{N_1} c_i(t) \varphi_i(x, y), \quad \Phi_2 = \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} c_i(t) \phi_i(x, y), \quad \Phi_3 = \sum_{i=N_1+N_2+1}^{N_1+N_2+N_3} c_i(t) f_i(x, y).$$

Then required function can be (u, v и w) can be written in the form:

$$\begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^{N_1} c_i(t) u_i(\omega, x, y), \\ v &= \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} c_i(t) v_i(\omega, x, y), \\ w &= \sum_{i=N_1+N_2+1}^{N_1+N_2+N_3} c_i(t) w_i(\omega, x, y). \end{aligned} \quad (9)$$

Here ω - the normalized equation of the boundary of the shell, and φ_i, ϕ_i и f_i - some complete (basic) system functions (power, Chebyshev, trigonometric polynomials, etc.) - the structure of solutions of undetermined coefficients subject to be determined.

Resolving equation (discrete model) for finding the structure of solutions of undetermined coefficients is obtained by substituting the structure of solutions to the equation (8), (9) and carrying out the sampling procedure in the spatial variables x and y .

In the case of the dynamics governing equation is a system of ordinary differential equations (SODE)

$$A\ddot{C} + BC = F \quad (10)$$

with initial conditions

$$C|_{t=t_0} = C_0, \quad \dot{C}|_{t=t_0} = \dot{C}_0, \quad (11)$$

where

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix},$$

$$A_1 = \iint_{\Omega} L_1 u_i u_j d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{1, N_1},$$

$$A_2 = \iint_{\Omega} L_2 v_i v_j d\Omega, \quad i = \overline{N_1+1, N_1+N_2}, \quad j = \overline{N_1+1, N_1+N_2},$$

$$A_3 = \iint_{\Omega} L_3 w_i w_j d\Omega, \quad i = \overline{N_1+N_2+1, N_1+N_2+N_3}, \quad j = \overline{N_1+N_2+1, N_1+N_2+N_3},$$

$$B_{11} = \iint_{\Omega} L_{11} u_i u_j d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{1, N_1},$$

$$B_{12} = \iint_{\Omega} L_{12} v_i u_j d\Omega, \quad i = \overline{N_1+1, N_1+N_2}, \quad j = \overline{1, N_1},$$

$$B_{13} = \iint_{\Omega} L_{13} w_i u_j d\Omega, \quad i = \overline{N_1+N_2+1, N_1+N_2+N_3}, \quad j = \overline{1, N_1},$$

$$B_{21} = \iint_{\Omega} L_{21} u_i v_j d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{N_1+1, N_1+N_2},$$

$$\begin{aligned}
B_{22} &= \iint_{\Omega} L_{22} v_j v_j d\Omega, \quad i = \overline{N_1+1, N_1+N_2}, \quad j = \overline{N_1+1, N_1+N_2}, \\
B_{23} &= \iint_{\Omega} L_{23} w_i v_j d\Omega, \quad i = \overline{N_1+N_2+1, N_1+N_2+N_3}, \quad j = \overline{N_1+1, N_1+N_2}, \\
B_{31} &= \iint_{\Omega} L_{31} u_i w_j d\Omega, \quad i = \overline{1, N_1}, \quad j = \overline{N_1+N_2+1, N_1+N_2+N_3}, \\
B_{32} &= \iint_{\Omega} L_{32} v_i w_j d\Omega, \quad i = \overline{N_1+1, N_1+N_2}, \quad j = \overline{N_1+N_2+1, N_1+N_2+N_3}, \\
B_{33} &= \iint_{\Omega} L_{33} w_i w_j d\Omega, \quad i = \overline{N_1+N_2+1, N_1+N_2+N_3}, \quad j = \overline{N_1+N_2+1, N_1+N_2+N_3}, \\
C_1 &= \iint_{\Omega} q_1 w_j d\Omega, \quad j = \overline{1, N_1}, \\
C_2 &= \iint_{\Omega} q_2 w_j d\Omega, \quad j = \overline{N_1+1, N_1+N_2}, \\
C_3 &= \iint_{\Omega} q_3 w_j d\Omega, \quad j = \overline{N_1+N_2+1, N_1+N_2+N_3},
\end{aligned}$$

Here L_i , L_j - the relevant differential operators equations.

In the case of static governing equation is a system of linear algebraic equations (SLAE)

$$BC = F \quad (12)$$

To solve the governing equations can be used known numerical methods of algebra and analysis, in particular for solutions the SODE (10)-(11) – Newmark method, and for solving the SLAE (12) – Gaussian elimination method. In this case the calculation of definite integrals representing the components for the mass and stiffness matrices, as well as vector component of right side, quite applicable numerical method for calculating the double integrals of Gauss.

And finally, the determination of the unknown functions - normal and tangential displacements of the middle surface of the shell is carried out on the structural formulas.

Structure of solutions to the boundary conditions:

Rigidly clamped edges

$$u = \omega\Phi_1, \quad v = \omega\Phi_2, \quad w = \omega^2\Phi_3;$$

Hinged boundary condition

$$u = \omega\Phi_1, \quad v = \omega\Phi_2, \quad w = \omega\Phi_3 - \omega^2(\Phi_3(D_2\omega + vT_2\omega) + 2D_1\Phi_3)/2;$$

Etc.

Here D_1 , D_2 , T_2 – differential operators.

In the fourth chapter «**Program complex for calculation of magnetoelasticity of plates and shells by F-function method**» of the thesis software system for settlement magnetoelastic thin plates and shells with complex shapes using R-functions is developed.

On the basis of the algorithm and performed modular analysis of algorithms for solving problems of magneto-elasticity of thin plates and shells with complex form, a new complex of software tools (CST) is elaborated. On the basis of the existing CST a new complex of programs has been developed, and its structure consists of the following blocks:

1. The library of types and constants.

2. The library of modules for R-operations and R-card transactions.
3. Library to determine the integrand.
4. Library for functions of geometry area (and their derivatives necessary order).
5. Library for structural formulas.
6. A library for generating points and weights of integrals.
7. The library elements to form authorizing the equation.
8. The library modules for solving governing equations.
9. The library of modules for processing the results of the calculation.
10. Block – Control program.

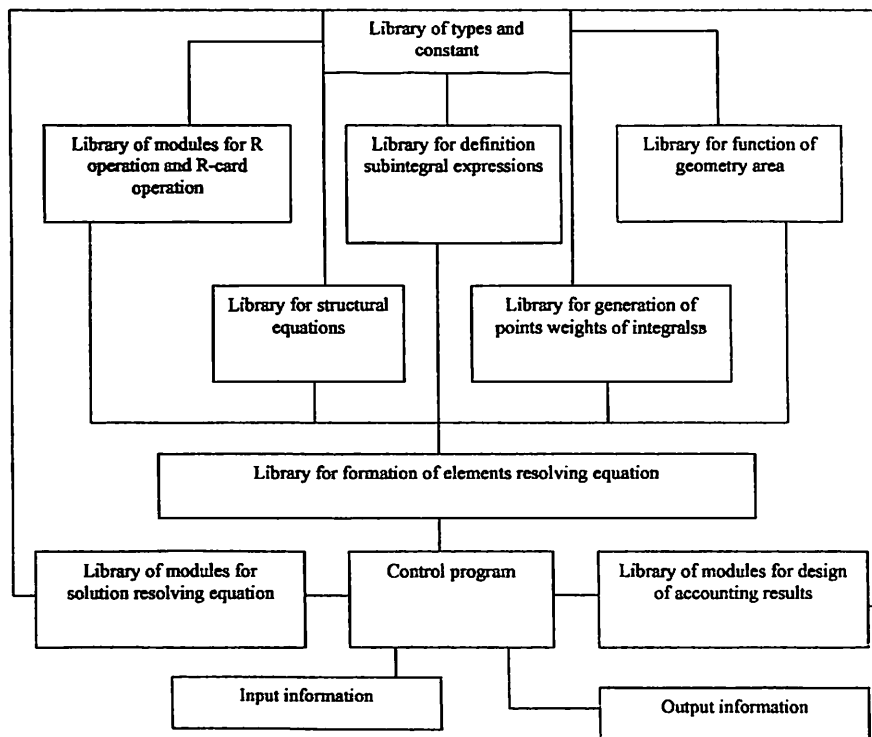


Fig. 1. The structure of complex software.

Each unit of the complex program consists of several modules, designed in the form of procedures and functions. A library of routines is created of these modules. This CST is implemented in DELPHI in the medium MS WINDOWS.

Designed by CST allows to automate the decision of boundary problems magnetoelasticity plates and shells with complex shapes in terms of systems of differential equations with partial derivatives, which reduce many problems of continuum mechanics.

The structure and interaction of basic blocks of CST is shown in Fig. 1.

An instruction for using the software is given.

In the fifth chapter «Computing experiments according to the solution of problems of magnetoelasticity of thin bodies by R-function method» of the thesis computational experiments on solving problems magneto-elasticity of thin plates and shells by the method of R-functions is given.

Static problem of magnetoelastic plates having circle and square form with a rigidly clamped and simply supported edge conditions are considered to substantiate the reliability of the approximate solution. The table below shows comparisons:

Table. Comparative analysis of exact and approximate solutions

(x,y)		Square, r.c.		Square, s.s.		Circle, r.c.	
X	Y	W_R	W_T	W_R	W_T	W_R	W_T
0.0	0.0	0.96787	1.0000	0.99745	1.00000	1.00002	1.00000
0.2	0.0	0.89655	0.9216	0.94895	0.95105	0.92160	0.92160
0.4	0.0	0.69533	0.7056	0.80787	0.80902	0.70561	0.70560
0.6	0.0	0.40978	0.4096	0.58741	0.58779	0.40960	0.40960
0.8	0.0	0.13136	0.1296	0.30845	0.30902	0.12961	0.12960

The table compares the exact values (W_T) and approximate (W_R) solutions of the problem by R-functions method of square, circular plates under appropriate boundary conditions at various points, which shows that obtained results have very slight difference from the calculation results of the exact solution, which guarantees a sufficient accuracy and the applicability of R-functions method to calculate the magnetoelastic plates with a complex shape.

The problem of bending of magnetoelastic plate in a magnetic field with a given magnetic field vector H (H_x, H_y, H_z) is considered in the dissertation. The equation of state in dimensionless coordinates of the plate, by (4) has the form

$$k_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + k_2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + k_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + k_4 \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + k_5 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + k_6 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k_7 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + k_8 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = q, \quad (13)$$

where

$$k_1 = 1 + \frac{I(H_y^2 + H_x^2)}{4\pi D}; k_2 = -2 \frac{IjH_x H_y}{4\pi D}; k_3 = 2j^2 + \frac{I \cdot j^2(H_x^2 + H_y^2 + 2H_x^2)}{4\pi D}; k_4 = -2 \frac{Ij^3 H_x H_y}{4\pi D};$$

$$k_5 = j^4 + \frac{Ij^4(H_x^2 + H_y^2)}{4\pi D}; k_6 = -\frac{ha^2(H_y^2 - H_x^2)}{4\pi D}; k_7 = -\frac{4hja^2 H_x H_y}{4\pi D}; k_8 = \frac{hj^2 a^2 (H_y^2 - H_x^2)}{4\pi D}.$$

First, as an example, take a copper plate having a circular shape with two circular cutouts, shown in Fig. 2, under the action of a uniformly distributed load q . here $\omega = F_1 \wedge (F_2 \wedge F_3)$. Logic functions for the reference fields $F1, F2$ and $F3$ are represented in the form:

$$F_1 = R^2 - x^2 - y^2 \geq 0; F_2 = (x-a)^2 + y^2 - r^2 \geq 0; F_3 = (x+a)^2 + y^2 - r^2 \geq 0,$$

where R – radius of the circular plate; r – radius of the circular cutout plate with center at $(a, 0)$ and $(-a, 0)$.

The following input mechanical and geometric parameters are assumed in calculation

$$H_x = H_y = H_z = 10 \text{ кгЭ}, (1 \text{ Э} = 1 \text{ кгЭ}^{1/2}/(\text{М}^{1/2} \text{сек}));$$

$$\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кгЭ}/\text{М}^3 - \text{the density of the plate material};$$

$$h = 10^{-2} \text{ М} - \text{thickness of the plate};$$

$$q = \frac{a^4 Q_3}{Dh} = 1 - \text{load acting on the plate};$$

$$E = 10^{11} \text{ Н}/\text{М}^2 - \text{modulus of elasticity};$$

$$\nu = 0,3 - \text{Poisson's ratio};$$

$$R = 1 \text{ М}; r = 0,2 \text{ М}; a = 0,5 \text{ М}.$$

Power polynomial is taken as a basic polynomial included in the solution structure.

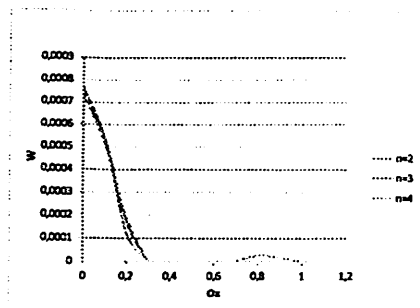


Fig. 2. Flexure on axes Ox

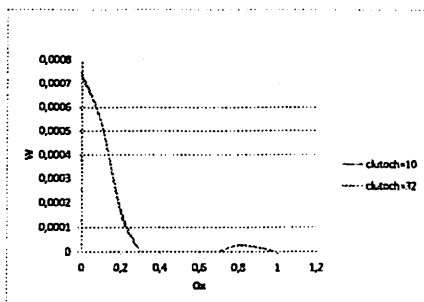


Fig. 3. Flexure on axes Ox

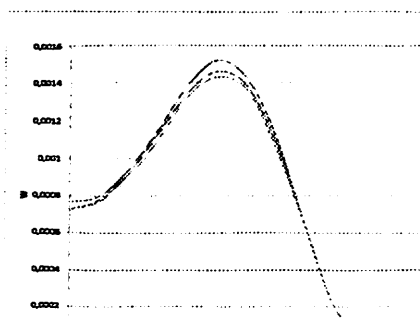


Fig. 4. Flexure on axes Oy

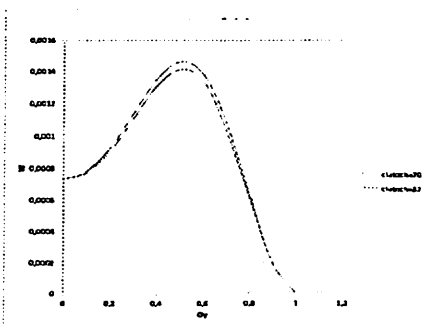


Fig. 5. Flexure on axes Oy

Fig. 2-5 shows the variation of W – deflection with respect to the polynomial degree (nk) and the number of nodes of the Gauss ($clutch$) on the cross sections OA and OB. Fig. 2 and 3 show graphs of the variation of deflection in the cross section of OA at $clutch = 20$, and nk is changed from 2 to 4, and when $nk = 3$, and receives $clutch$ 20 and 32, respectively. Fig. 4 and 5 show the same values of nk and $clutch$ respectively over the cross section of OY.

The graphs given in Fig. 2-5 show that the deflection reaches a maximum value in the cross section of OB approaching the point $x = 0, y = 0.5$, which should be expected. And the value of $nk = 3$ is sufficient for the investigation of the

problem in which there is a good convergence. It should also be noted that convergence is improved with increasing of clutoch.

Similar calculations are shown for a circular plate with four circular cutouts. The study is conducted with the same input of technical and geometrical parameters as in the first problem.

The problem of the bending of the plate-shaped magnetoelastic octahedron is also considered, rigidly clamped around the whole contour.

$$\text{Here } \omega = (F_1 \wedge F_2) \vee (F_3 \wedge F_4),$$

where $F_1 = a^2 - x^2 \geq 0$; $F_2 = a^2 - y^2 \geq 0$; $F_3 = b^2 - (x + y)^2 \geq 0$; $F_4 = b^2 - (x - y)^2 \geq 0$.

Calculations are conducted in value of $a = 1/\sqrt{2}$ and $b = 1$.

Further, the dissertation investigated the influence of electromagnetic forces, in particular the strength of the magnetic field on the stress-strain state, when the plate is pivotally mounted around contour and has a complex shape.

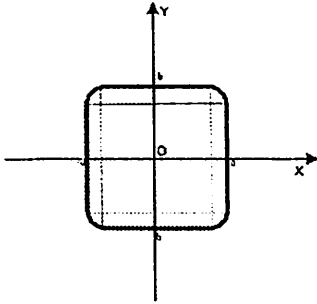


Fig. 6. Rectangle with rounded corners

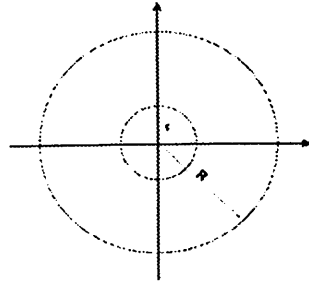


Fig. 7. Circular plate

Next, the fluctuation of magnetoelastic thin rectangular plate with rounded corners in a constant magnetic field when the magnetic field is calculated from the magnetostatic problem is considered, the annular plate with mixed-boundary conditions (rigidly clamped around the external circle and simply around the internal circle) which are represented in Fig. 6-7, relatively.

The calculations of deflection state in different points of rigidly clamped around the whole contour plate with complex shape, i.e. Rectangled plate with rounded corners under the magnetic field and without it are shown in Fig. 8-9.

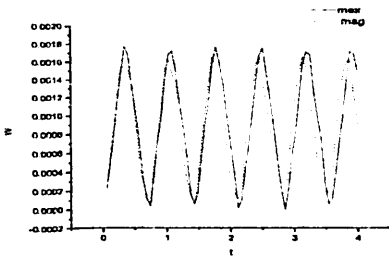


Fig. 8. Fluctuation of the plate at the point $(-0.9, 0)$

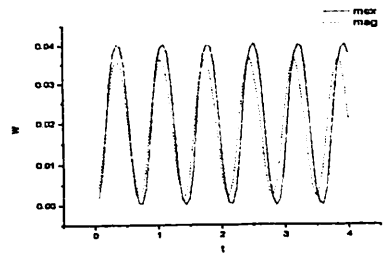


Fig. 9. Fluctuation of the plate at the point $(0, 0)$

Analysis of the results of calculation enables to submit about the impact of the effects of electromagnetic fields on the thin conductive plate. In particular the influence of the electromagnetic force is greater in the center of the plate.

Sequence of coordinate functions satisfying the mixed boundary conditions built by the R-function method in the form of the decision structure is presented as following:

$$w = \omega_1^2 \Phi_1 + \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{2(\omega_1^2 + \omega_2^2)} * \left\{ -\frac{\omega_2}{3} [D_3^{(2)} + (2-\nu)D_1^{(2)}T_2^{(2)}] * \right. \\ \left. * (\omega_1^2 \Phi_1 - \omega_2^2 [D_2^2(\omega_1^2 \Phi_1) + \nu T_2^2(\omega_1^2 \Phi_1)] - D_2^2(\omega_1^2 \Phi_1) - \nu T_2^2(\omega_1^2 \Phi_1)) \right\}$$

$$\text{here } \omega_1 = \frac{R^2 - x^2 - y^2}{2R}, \quad \omega_2 = \frac{r^2 - x^2 - y^2}{2r}, \quad \Phi_1 = \sum_{i,j=0}^n C_{ij} \chi_i(x) \chi_j(y).$$

where ω_1 – boundary function on diameter of great circle, ω_2 – function of internal boundary on diameter of small circle, Φ_1 – division formula of provisional and spatial variable, D_i, T_i – differential operators, R, r – respectively radius of the great and small circles.

Parameters: $D = 5,3 \text{ мм}$ ($R = D/2$) – diameter of great circle;

$d = 1,9 \text{ мм}$ ($r = d/2$) – diameter of small circle;

$h = 0,6 \text{ мм}$ – thickness of the plate;

material – brass (Л170), $\sigma = 910 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ – yield point;

$E = 89 \text{ ГПа} = 89 * 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ – modulus of elasticity;

$G = 34 \text{ ГПа} = 34 * 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ – modulus of rigidity;

$\nu = 0,3$ – Poisson's ratio; $\rho = 8,33 * 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$ – density of the material;

$q = 4400 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ ($q = 4400 \sin\left(\frac{\pi}{t_n}\right) \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$) – theoretically maximum pressure;

here t changes from t_0 до t_n $t_0 = 0$, $t_n = 0,003276 \text{ сек}$ – load running time.

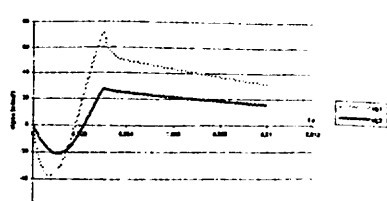
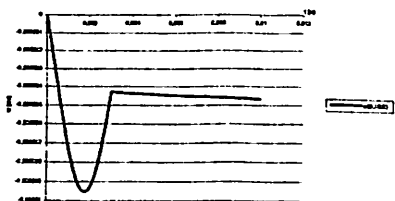


Fig. 10. displacement diagram in the point $(0.15, 0)$

Fig. 11. Stress diagram in the point $(0.15, 0)$

Fig. 10-11 show the calculation results of the deflection and Stress in characteristic points of the area.

CONCLUSION

On the basis of studies on the doctoral thesis « Mathematical modeling of processes of the electromagnetic fields' effects on deformational condition of thin conductive bodies by the method of R-function» presented the following conclusions:

1. The fundamental geometric and physical relationships of the linear elasticity theory and linear electrodynamics are defined taking into account properties of the structure and mechanical characteristics of the material for electro-conductive thin bodies under the influence of electromagnetic forces;

2. new mathematical models are developed and a two-dimensional mathematical model of magnetic elasticity of thin shells and plates is built on the basis of generalized principle of Hamilton-Ostrogradsky using the Kirchhoff-Lyav hypothesis for thin bodies taking into account the linear Cauchy relations and Hooke's law of elasticity and relations of the linear theory of electrodynamics, in particular, Maxwell's equations, the influence of the electromagnetic field is determined by the volume of Lorentz ponderomotive forces but the surface and contour forces are defined by Maxwell's electromagnetic tensor.

3. analytical and numerical methods and algorithms for solving systems of differential equations with initial-boundary conditions describing the effect of electromagnetic fields on the deformation state of the conductive thin bodies (plates and shells) complex shape with a joint application of the variational method of Bubnov-Galerkin method and the structural R-functions method are developed and the resolving equations (discrete model) are obtained.

4. solution structure (sequence of coordinate functions) to the basic boundary value problem of magneto-elastic plates and shells with complex configuration area (a circle with two and four circular cutouts, polygon, rectangle with rounded corners, etc.) by the method of R-functions is formed and normalized equations for complex fields of the thin bodies, using card operations of algebraic the R-functions theory is constructed;

5. Vector-matrix equations for discrete models of magnetic elasticity of the subtle bodies, formed by the corresponding block of the matrix of damping, etc. when modeling thin-walled structures defined by systems of linear algebraic and ordinary differential equations with initial conditions and numerical methods for solving these systems of equations based on the use of quadrature sums, methods of Newmark and Gaussian elimination is developed;

6. software in the form of a complex of programs for calculation of magnetic elasticity of thin bodies by the method of R-functions on the computer, consisting of ten core modules is developed on the base of modular analysis of algorithms for solving problem classes of magnetic elasticity of thin plates and shells with complex shape;

7. numerically-analytical methods are developed and the validity of the obtained numerical calculation results of magnetic elasticity for thin plates of areas a classic shape (square, circle) by comparing exact and approximate solutions by the R-functions method is substantiated, moreover the plates having rigidly-

clamped and hinged-simply supported boundary conditions are considered. The convergence of the computational algorithm of calculating the magnetic elasticity of thin shells and plates with complex structural form with regard to the number of coordinate functions of the structure of the solutions built by R-functions method and on the number of nodes (points) when calculating double integrals is studied. As the basic polynomial is selected by power polynomial, and good convergence is observed when the degree of the polynomial 3-4 (which corresponds to 10-15 coordinate functions).

8. computational experiments on the solution of problems of statics of magnetic elasticity for thin plates of complex configuration (with two circle and four circular cutouts, complex polygon shape, a ring) are described on the basis of the developed algorithmic and software Toolkit (software package). The effect of static electromagnetic field on the deformation state of the plate with rigidly-clamped and hinged boundary conditions at a given magnetic field with different values and directions of the magnetic field is shown;

9. The dynamic effect of the electromagnetic field on the deformation state of the plate with rigidly-clamped and hinged boundary conditions on the basis of the developed algorithmic and software complex and computational experiments on problems of dynamics of magnetic elasticity of thin bodies for areas with a complex configuration by the R-functions method is studied. Plates of constant thickness, made of a material with finite electrical conductivity in an external electromagnetic field are considered. This problem is solved in two stages: the first is the problem of electrostatics and determine the values of the magnetic field, the second solves the problem of magnetic elasticity using the values of the magnetic field. The dynamic effect of the electromagnetic field on the deformation state of the thin bodies of complex structural forms is defined.

10. The results obtained in the form of algorithmic and software tools are implemented in the solution of specific problems of magnetic elasticity of thin shells and plates with complex configuration in the framework of the contract and economic efficiency in the amount of 127.8 million soums is obtained as a result of the implementation.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Nuraliev F.M. Algorithmization in Magneto-elasticity of Thin Plates and Shells of the Complex Configurations // Computer Science and Information Technology. – USA, 2015. – Vol. 3(3). – PP. 66-69. (05.00.00; №6).
2. Anarova Sh.A., Nuraliev F.M., Dadenova G.K. Mathematical model of spatially loaded bars with account of torsion function and transverse shears // International Journal of Technical Research and Applications. – India, 2016. – Vol. 4. – Issue 1. – PP. 28-38. ISSN 2320-8163. (№5) Global Impact Factor, IF=0,314.
3. Nazirov Sh.A., Nuraliev F.M. Mathematical modeling of state of magneto-elastic plates of complex form // Узбекский журнал "Проблемы информатики и энергетики". – Ташкент, 2003. – № 4. – С. 20-25. (05.00.00; №5).
4. Нуралиев Ф.М. Численное исследование сходимости алгоритма расчета динамики магнитоупругих пластин // Узбекский журнал "Проблемы информатики и энергетики". – Ташкент, 2004. – № 6. – С. 58-61. (05.00.00; №5).
5. Нуралиев Ф.М. Расчет динамики магнитоупругих пластин со сложной формой // Узбекский журнал "Проблемы информатики и энергетики". – Ташкент, 2005. – № 3. – С. 99-103. (05.00.00; №5).
6. Нуралиев Ф.М. Модульный анализ алгоритмов решения классов задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек // Узбекский журнал "Проблемы информатики и энергетики". – Ташкент, 2006. – № 5. – С. 32-36. (05.00.00; №5).
7. Нуралиев Ф.М. Алгоритм расчета магнитоупругих пологих оболочек методом R-функций // Узбекский журнал "Проблемы информатики и энергетики". – Ташкент, 2007. – № 5-6. – С. 89-93. (05.00.00; №5).
8. Кабулов В.К., Нуралиев Ф.М. Алгоритмизация в магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной формы в плане // Доклады АН РУз. – Ташкент, 2008. – № 4. – С. 43-48. (05.00.00; №9).
9. Бондаренко Б.А., Кабулов В.К., Нуралиев Ф.М. Полилинейная векторно-матричная модель обобщенных уравнений Максвелла с учетом диссипации и операторное представление их решений // Узбекский журнал "Проблемы информатики и энергетики". – Ташкент, 2008. – № 6. – С. 3-7. (05.00.00; №5).
10. Нуралиев Ф.М. Описание программных средств для автоматизации решения классов задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек // Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2011. – №. 3. – С. 55-58. (05.00.00; №10).
11. Нуралиев Ф.М. Описание модулей программного комплекса для расчета магнитоупругости пластин и оболочек со сложной формой // Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2014. – №. 2 (30). – С. 110-113. (05.00.00; №10).

И бўлим (II часть; II part)

12. Anarova Sh.A., Nuraliev F.M. Study of Stressed State of Elastic Prismatic Bodies of Arbitrary Section with a Cavity in Problems of Constraint Torsion // International Journal of Scientific and Innovative Mathematical Research. – India, 2015. – Vol. 3. – Issue 2. – PP. 1-15. ISSN 2347-3142.

13. Нуралиев Ф.М. О построении математических моделей магнитоупругости тонких пластин и оболочек // Техника и технология. – Москва, 2009. – № 1. – С. 14-17. ISSN 1811-3532.

14. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М. Алгоритмизация решения задач магнитоупругости тонких тел методом R-функций // Проблемы машиностроения, – Харьков, 2011. – Т. 14. – №1. – С. 61-69. ISSN 0131-2928.

15. Nazirov Sh.A., Nuraliev F.M. Mathematical Modeling of Processes of Electro-Magnetic Fields' Affection Thin Conducting Plates by Complex Form // American Journal of Computational and Applied Mathematics. – USA, 2012. – Vol. 2 (1). – PP. 30-33. ISSN 2165-8943.

16. Nazirov Sh.A., Nuraliev F.M., Anorova Sh.A. Study of Numeric Convergence of the Method of R-functions in Problems of Constraint Torsion // American Journal of Computational and Applied Mathematics. – USA, 2012. – Vol. 2 (4). – PP. 189-196. ISSN 2165-8943.

17. Нуралиев Ф.М., Назиров Ш.А., Юлдашев Т.О. выводе математических моделей магнитоупругости тонких оболочек и пластин / Вопросы вычисл. и прикл. математики: Сб. научн. тр. – Ташкент: ИМИТ АН РУз, 2006. – Вып. 117. – С. 63-72.

18. Нуралиев Ф.М. Вывод уравнений движения магнитоупругих пластин в системе Maple / Вопросы вычисл. и прикл. математики: Сб. научн. тр. – Ташкент: ИМИТ АН РУз, 2007. – Вып. 118. – С. 110-116.

19. Нуралиев Ф.М. Математические модели магнитоупругости тонких оболочек и пластин / Вопросы вычисл. и прикл. математики: Сб. научн. тр. – Ташкент: Центр РППиАПК при ТУИТ, 2012. – Вып. 128. – С. 53-63.

20. Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш. Расчет магнитоупругих анизотропных пластин со сложной формой // Восьмой всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: Тез. докл. 23-29 августа 2001. – Пермь, 2001.

21. Нуралиев Ф.М. Алгоритмизация статического и динамического расчета магнитоупругих пластин со сложными конфигурациями // Современные проблемы алгоритмизации и программирования: Тез. докл. Республиканской научной конференции. 5-7 сентября 2001. – Ташкент, 2001. – С. 121-122.

22. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б. Алгоритм решения магнитоупругих тонких пластин во внешнем магнитном поле // Математические методы в технике и технологиях: Сборник трудов XVI Международной научной конференции. Т. 5. Секция 5. РГАСХМ ГОУ. – Ростов-на-Дону, 2003. – С. 73-74.

23. Нуралиев Ф.М. Математическое моделирование магнитоупругого поведения тонких пластин со сложной формой // Информационно-вычислительные технологии в решении фундаментальных и прикладных научных задач: Материалы электронной конференции. <http://www.ivtn.ru>. – М., 2004.

24. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б. Алгоритм расчета магнитоупругих колебаний тонких электропроводимых пластин со сложной формой в стационарном магнитном поле // Инфокоммуникационные и вычислительные технологии в науке, технике и образовании: Тез. докл. Международной конференции. 28-30 сентября 2004. – Ташкент, 2004. – С. 238-242.

25. Назиров Ш.А., Юлдашев Т., Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш. Моделирование процессов колебаний тонких магнитоупругих пластин в продольном магнитном поле // Проблемы механики и сейсродинамики сооружений: Тез. докл. Международной научной конференции. 27-28 мая 2004. – Ташкент, 2004. – С. 347-349.

26. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М. Математические модели магнитоупругих тонких пластин // Современные проблемы математической физики и информационных технологий: Труды международной конференции. 18-25 апреля 2005. Том №2. – Ташкент, 2005. – С. 194-198.

27. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш. Алгоритмизация решения классов многомерных задач магнитоупругости тонких пластин и оболочек // Современные проблемы и перспективы механики: Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию М.Т.Уразбаева. 17-18 мая 2006. – Ташкент. – С. 318-321.

28. Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш. Об одном алгоритме решения задачи колебания магнитоупругой тонкой пластины // Информационно-вычислительные технологии в решении фундаментальных и прикладных научных задач: Материалы электронной конференции. <http://www.ivtn.ru>. – М., 2006.

29. Nazirov Sh.A., Nuraliev F.M. Algorithmization of the decision of classes of multidimensional problems of magneto-elasticity of thin plates and shells // ICI 2006. September 19-21 2006. – Tashkent, 2006. <http://www.omidiyar-institute.org/ici2006>.

30. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш. Алгоритмизация решения задач магнитоупругости тонких тел методом R-функций // Актуальные проблемы прикладной математики и механики: Материалы Международной конференции. 23-26 октября 2006. – Харьков, 2006.

31. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш. Колебание магнитоупругой тонкой пластины в постоянном магнитном поле // Актуальные проблемы механики сплошной среды и прочности конструкций: Материалы Международной научно-технической конференции памяти академика В.И.Моссаковского. 17 - 19 октября 2007. – Днепрпетровск, 2007.

32. Нуралиев Ф.М. Алгоритмизация в магнитоупругости тонких пластин и оболочек // Современные проблемы математического

моделирования и вычислительных технологий: Материалы Международной научной конференции. 18-24 августа 2008. – Красноярск. 2008.

33. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш. Моделирование движения пластины со сложной формой в электромагнитном поле // Новые математические модели в механике сплошных сред: построение и изучение: Материалы Всероссийской конференции. 23-28 апреля 2009. – Новосибирск, 2009.

34. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М. Алгоритмизация расчета классов двумерных задач взаимодействия электромагнитных и деформационных полей // Моделирование и исследование устойчивости динамических систем (DSMSI-2009): Материалы Международной конференции. 27-29 мая 2009. – Киев, 2009.

35. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М. Расчет взаимодействия деформационных и электромагнитных полей для оболочек (пластин) со сложной формой // Распространение упругопластических волн: Материалы Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Халила Ахмедовича Рахматулина. 28-29 мая 2009. – Бишкек, 2009.

36. Bondarenko V.A., Nuraliev F.M. The operator representation of the solutions of Goursat' and Rique' problems for the iterated polyvibrating equations // III конгресс математиков тюркского мира. 30 июня 2009. – Алматы, 2009.

37. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М. Моделирование деформированного состояния тонких пластин и оболочек сложной формы, находящихся в электромагнитном поле // Современные проблемы механики: Материалы Международной научно-технической конференции. 23-24 сентября 2009. – Ташкент, 2009.

38. Нуралиев Ф.М. Решение одной задачи магнитоупругости тонкой пластины в MAPLE // Моделирование и управление в реальном секторе экономики: Материалы Республиканской научной конференции. 23-26 сентября 2009. – Ташкент, 2009.

39. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М. Математическое моделирование процессов влияния магнитного поля на электропроводные тонкие тела сложного очертания // Материалы XIII Международной научной конференции памяти академика М. Кравчука. 13–15 мая 2010. – Киев, 2010.

40. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М. Математическое моделирование процессов влияния электромагнитного поля на тонкую проводящую пластину сложной формы // The 4th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2010). 12-14 October 2010. – Tashkent, 2010. <http://aict2010.qafqaz.edu.az>.

41. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М. Алгоритмизация в магнитоупругости тонких пластин и оболочек сложной формы // Ҳалқ хўжалиги тармоқларида жараёнларни математик моделлаштириш ва бошқариш муаммолари: Материалы Республиканской научно-практической конференции. 22-23 апреля 2011. – Карши, 2011. – С. 147-148.

42. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М. Матричный метод Ньюмарка для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений // Проблемы

- современной математики: Труды научной конференции. 22-23 апреля 2011. – Карши, 2011. – С. 458-462.
43. Нуралиев Ф.М. Алгоритмизация решения классов задач магнитоупругости тонких тел сложной конфигурации // Современное состояние и перспективы развития информационных технологий: Тез. докл. республиканской научно-технической конференции. 5-6 сентября 2011. – Ташкент, 2011. – Т. I. – С. 203-208.
44. Nazirov Sh.A., Nuraliev F.M. Mathematical models of nonlinear vibrations of thin shells and plates in a magnetic field // Proceedings of the 4th International Conference on Nonlinear Dynamics (ND-KhPI 2013), June 19-22 2013. – Sevastopol, 2013. – PP. 315-318.
45. Nuraliev F.M. Mathematical modeling of the effects of electromagnetic fields on thin conducting bodies by complex form // 1st KHU-TUIT International Conference for ICT & Knowledge Economy. August 25-26 2014. – Tashkent, 2014. – PP. 121-131.
46. Нуралиев Ф.М., Сафаров Ш. Алгоритмизация в магнитоупругости тонких оболочек и пластин сложной конфигурации // Проблемы информационных и телекоммуникационных технологий: Сб. докл. Республиканской научно-практической конференции. 12-13 март 2015. – Ташкент, 2015. – Ч. 2, С. 143-147.
47. Nuraliev F.M., Saparov Sh. Mathematical modeling of processes of the electromagnetic fields' effects on thin conductive bodies by the method of R-function // International scientific and practical conference, WORLD Science. Proceedings of the conference Scientific issues of the modernity. April 20-21 2015. – Dubai, 2015. – Vol. II, PP. 24-29.
48. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Каримова В.А. Автоматизированная система для исследования статики и динамики упругих, упругопластических и магнитоупругих пластин со сложными конфигурациями // ГПВ РУз. Свидетельство № DGU 00327. 26.05.2000 г.
49. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш. Программный комплекс для автоматизации решения классов задач взаимодействия электромагнитных и деформационных полей // ГПВ РУз. Свидетельство № DGU 01434. 14.11.2007 г.
50. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Султанов Б.Ж. Автоматизированная система расчета сетчатых пластин со сложной конфигурацией // ГПВ РУз. Свидетельство № DGU 01953. 21.04.2010 г.
51. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Жумаев С.С. Автоматизированная система расчета многослойных пластин со сложной формой // ГПВ РУз. Свидетельство № DGU 02240. 07.07.2011 г.
52. Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Жумаев С.С. Программное обеспечение для решения многомерных линейных уравнений классов задач математической физики // ГПВ РУз. Свидетельство № DGU 02387. 22.12.2011 г.

Автореферат «ТАТУ хабарлари» илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус, инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди (25.05.2016 й.).

Босишга рухсат этилди: 24.06.2016 йил
Бичими 60x84 1/16, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 5. Адади: 100. Буюртма: № 171.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ» ДУК