

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2021.Т.142.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

АРТИКБАЕВ МАҲКАМ АРТИКБАЕВИЧ

**МУРАККАБ ШАКЛДАГИ ЮПҚА АНИЗОТРОП
ПЛАСТИНАЛАРНИНГ МАГНИТЭЛАСТИКЛИК
ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШ ҲОЛАТИНИ МАТЕМАТИК
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

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

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on technical sciences**

Артикбаев Маҳкам Артикбаевич Мураккаб шаклдаги юпқа анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик деформацияланиш ҳолатини математик моделлаштириш	5
Артикбаев Маҳкам Артикбаевич Математическое моделирование деформированного состояния магнитоупругих тонких анизотропных пластин сложной формы	21
Artikbayev Mahkam Artikbayevich Mathematical modeling of the deformed state of magnetoelastic thin anisotropic plates of complex form	39
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works	43

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2021.Т.142.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**РАҚАМЛИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ВА СУНЪИЙ ИНТЕЛЛЕКТНИ
РИВОЖЛАНТИРИШ ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

АРТИКБАЕВ МАҲКАМ АРТИКБАЕВИЧ

**МУРАККАБ ШАКЛДАГИ ЮПҚА АНИЗОТРОП
ПЛАСТИНАЛАРНИНГ МАГНИТЭЛАСТИКЛИК
ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШ ҲОЛАТИНИ МАТЕМАТИК
МОДЕЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (Phd) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2022.4.PhD/Т3002 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.airi.uz) ва «Ziyonet» Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Нуралиев Фахриддин Муродиллаевич
техника фанлари доктори, доцент

Расмий оппонентлар:

Полатов Асхад Мухамеджанович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Индиаминов Равшан Шукурович
физика-математика фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот:

Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети

Диссертация химояси Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги DSc.13/30.12.2021.Т.142.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил « 21 » декабр соат 14:00 даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳар, Мирзо Улуғбек тумани, Бўз-2 даҳаси, 17А-уй. Тел.: (99871) 263-41-98, e-mail:info@airi.uz)

Диссертация билан Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (20 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳар, Мирзо Улуғбек тумани, Бўз-2 даҳаси, 17А-уй. Тел.: (99871) 263-41-98).

Диссертация автореферати 2022 йил « 6 » декабр куни тарқатилди.
(2022 йил « 22 » ноябр даги 26 рақамли реестр баённомаси).



Handwritten signature

Н.С. Маматов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, техника фанлар доктори, профессор

Handwritten signature

Н.О. Рахимов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, техника фанлар доктори

Handwritten signature

Н. Равшанов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, техника фанлар доктори, профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон миқёсида эгилувчан анизотроп юпка пластиналардан техниканинг ҳар хил соҳаларида кенг қўлланилмоқда. Улар қурилиш иншоотларида, кemasозлик, машинасозлик, турли ўлчов асбобларини ишлаб чиқаришда ва бошқа соҳаларнинг муҳим конструктив элементлари ҳисобланади. Техник қурилмаларни ишлаб чиқаришда базавий элементининг ҳолатларини электромагнит ва механик майдонларнинг ўзаро таъсири натижасида ўзгаришларини ахборот коммуникация технологиялари асосида тадқиқ қилиш муҳим аҳамият касб этмоқда. Дунёнинг ушбу соҳада ривожланган давлатлари, жумладан, АҚШ, Россия Федерацияси, Хитой, Япония, Туркия Жанубий Корея, Эрон, Арманистон, Ҳиндистон ва бошқа мамлакатларда электромагнит майдон кучларини ҳисобга олган ҳолда мураккаб шаклдаги юпка магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизиқли деформацияланиш жараёнларини математик моделлари, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуаларини ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этмоқда.

Жаҳонда кейинги йилларда пластина ва қобик каби конструкция элементлари материалларининг анизотроп хоссаларини ҳисобга олиб, уларнинг деформацияланиш ҳолатини тадқиқ этишда, математик моделларни ривожлантиришга катта эътибор берилмоқда. Хусусан, конструкция элементларининг турли физик-механик хоссалари анизотроп материалларда сезиларли аҳамият касб этади. Дунё олимлари томонидан электромагнит майдонларнинг электрўтказувчан пластина ва қобик шаклидаги конструктив микроэлементларнинг деформацияланиш ҳолатига таъсир этиш жараёнларини математик моделлаштириш, магнитэластиклик масалаларини ечишнинг ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуаларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Республикамызда замонавий техник қурилмаларининг конструктив элементлари ҳисобланадиган электрўтказувчан жисмларнинг деформацияланиш масаласини тадқиқ қилишга доир бир қатор тадқиқотлар олиб борилмоқда ва ушбу соҳада кенг қўламли илмий-тадқиқот ишларини амалга ошириш учун янги имкониятлар яратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... иқтисодиёт, ижтимоий соҳага, бошқариш тизимига информацион-коммуникацион технологияларни жорий этиш, муҳандислик-коммуникация ва ижтимоий инфратузилмани ривожлантириш ҳамда модернизация қилиш» вазифалари белгиланган. Шунга кўра, электромагнит майдон таъсирини ҳисобга олган ҳолда мураккаб шаклдаги юпка анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик деформацияланиш ҳолатини тадқиқ қилиш ва ушбу типдаги масалаларни ечиш жараёнини автоматлаштирувчи дастурий мажмуани ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора тадбирлари тўғрисида»ги, 2019 йил 20 сентябрдаги ПҚ-4464-сон «Қурилиш соҳасига ахборот-коммуникация технологияларини кенг жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2021 йил 10 февралдаги ПҚ-4986-сон «Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини янада ривожлантиришга инвестицияларни жалб қилиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот иши республика фан ва технологиялари ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналишларига мувофиқ амалга оширилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Жаҳонда эластик жисмларнинг электромагнит майдони таъсирида деформацияланиш жараёнларини тадқиқ қилиш, пластина ва қобиқ шаклидаги конструктив элементларининг магнитэластиклик, электромагнитэластиклик, термоэлектромагнитэластиклик деформацияланиш жараёнларини математик моделлаштириш каби масалалар билан бир қатор олимлар: F.Ebrahimi, M.R.Barati, A.Dabbagh, M.Karimiasl, N.M.Faleh, M.R.Garcia, M.Hosseini, A.Jamalpoor, A.Ahmadi-Savadkoohi, G.Altay, R.K.Bhangale, T.Buchukuri, Yu Li Jiang, H.L.Dai, Y.L.Qu, G.Y.Zhang, Z. Sharifi, M. Vinyas, Z.J.Wang, D.Hasanyan, A.Barakati, В.Л.Рвачев, Л.В.Курпа, Ю.С.Шкенов, С.А.Амбарцумян, Г.Е.Багдасарян, М.В.Белубекян, Д.И.Бардзокас, Л.В.Мольченко, И.Т.Селезов, М.Р.Короткина ва бошқа хорижий олимлар томонидан илмий тадқиқот ишлари олиб борилган.

Республикамизда эгилувчан ҳамда электрўтказувчан жисмларнинг эластиклик ва пластиклик масалаларини тадқиқ қилиш, юпқа мураккаб шаклдаги пластина ва қобиқларнинг магнитэластик деформацияланиш жараёнларини математик моделлаштириш, яъни чизикли ва ночизикли математик моделларини яратиш, ҳисоблаш алгоритмларини ва дастурий мажмуасини ишлаб чиқиш борасида: Х.А.Рахматулин В.К.Кобулов, Т.Бўриев, К.Ш.Бобомурадов, Ф.Б.Бадалов, Б.Курманбаев, Ш.А.Назирова, Т.Юлдашев, А.М.Полатов, А.А.Халджигитов, Р.Ш.Индиаминов, Ф.М.Нуралиев, Ш.А.Анарова каби мамлакатимиз олимлари илмий-тадқиқот ишларини олиб боришган.

Соҳага оид илмий тадқиқотлар таҳлили шуни кўрсатадики, мазкур соҳада кўпгина кўриб чиқилган ишларда пластиналарнинг геометрик шакли классик кўринишдадир. Анизотроп ҳолда, мураккаб шаклли магнитэластик

анизотроп пластинанинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини математик моделлаштириш муаммолари ҳозирги кунга қадар етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот ва олий таълим муассасаларининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқотлари Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институти ҳамда Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги Тошкент ахборот технологиялари университетининг илмий-тадқиқот лойиҳаларини тадқиқ этиш режалари асосида олиб борилди: А-ОТ-2021-108 «Оролбўйи минтақасининг атроф-муҳит ва экологик ҳолатини мониторинг қилиш ва прогнозлашнинг ахборот-таҳлилий дастурий маҳсулотини яратиш» (2021-2022), П-4721071198 «3Д технологиялар асосида ахборот технологиялари бўйича миллий виртуал университет тизимини яратиш» (2022).

Тадқиқотнинг мақсади электромагнит майдон кучларини ҳисобга олган ҳолда мураккаб конфигурацияли магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини математик моделлаштириш, ҳисоблаш алгоритмининг ва дастурий мажмуасининг таркибий тузилмасини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

илмий тадқиқот ишининг мақсади ва вазифаларини шакиллантириш учун тадқиқ қилинаётган соҳага оид адабиётлар таҳлилини қилиш;

электромагнит майдон кучларини, ночизикли эластиклик назарияларини ва материалнинг анизотроп хоссаларини ҳисобга олган ҳолда юпқа магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини математик моделини ишлаб чиқиш;

мураккаб шаклдаги юпқа магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш масаласини сонли усуллар асосида ечишни ҳисоблаш алгоритмининг ишлаб чиқиш;

юпқа мураккаб шаклдаги магнитэластик анизотроп пластиналарнинг деформацияланиш жараёнларини ўрганишни автоматлаштирадиган дастурий мажмуасининг таркибий тузилмасини яратиш;

мураккаб конструкцияли шаклларга эга юпқа анизотроп магнитэластик пластиналар учун чегараларини маҳкамлаш ҳолатларини ҳисобга олган ҳолда тегишли чегаравий шартларда ҳисоблаш тажрибаларни ўтказиш ва таҳлил қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида мураккаб шаклдаги юпқа анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик деформацияланиш ҳолатлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети электромагнит майдон таъсирларини ҳисобга олган ҳолда мураккаб шаклдаги юпқа анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини тадқиқ этиш учун математик моделлар, аналитик ва сонли усуллар, ҳисоблаш алгоритмлари ҳамда дастурий мажмуаси ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида математик моделлаштиришда эластиклик назариясига асосланган вариацион тамойиллар ва гипотезалар, юқори даражали хусусий ҳосилалари дифференциал тенгламалар тизмини ечишнинг сонли усуллари, шунингдек объектга йўналтирилган замонавий дастурлаш технологияларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

электромагнит майдон кучларини ва ночизикли эластиклик назарияларини ҳисобга олган ҳолда Гамильтон-Остроградский вариацион тамойили асосида юпқа магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини математик модели ишлаб чиқилган;

юпқа мураккаб конструкциявий шаклдаги магнитэластик анизотроп пластиналарни сонли ечиш учун аналитик R-функция усули (RFM) ва вариацион Бубнов-Галеркин ҳамда сонли усулларни биргаликда қўллаган ҳолда ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган;

RFM усули, вариацион Бубнов-Галеркин усули, Ньюмарк ва Гаусс усулларини қўллаган ҳолда ҳисоблаш алгоритми асосида мураккаб шаклли эгилувчан анизотроп пластиналарнинг деформацияланиш жараёнларини ўрганишни автоматлаштирадиган дастурий мажмуасининг таркибий тузилмаси яратилган;

мураккаб конструкциявий шаклларга эга юпқа анизотроп магнитэластик пластиналар учун чегараларини маҳкамлаш ҳолатларини ҳисобга олган ҳолда тегишли чегаравий шартларда ҳисоблаш тажрибалари ўтказилиб янги натижалар олинган ва таҳлил қилинган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

мураккаб шаклдаги юпқа магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш масаласини сонли ечиш учун R-функция усули, вариацион Бубнов-Галеркин усули, Ньюмарк усули ва бир қанча сонли усулларни биргаликда қўллаган ҳолда ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган;

юпқа мураккаб конструкциявий шаклдаги магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизикли масалаларини ечиш жараёнини автоматлаштириш дастурий мажмуаси яратилган;

электромагнит майдон таъсирини ва материалнинг анизотроп хоссаларини ҳисобга олган ҳолда мураккаб шаклдаги юпқа магнитэластик пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш ҳолатларини янги масалалари тадқиқ қилинган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги масаланинг қўйилиши ва уни математик моделини ишлаб чиқишда Гамильтон-Остроградский вариацион тамойилига асосланганлиги, масалани ечишда R-функция усули, вариацион Бубнов-Галеркин усули, Ньюмарк усули ва бир қанча сонли усулларни биргаликда қўллашга асосланган ҳолда ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритмини, координата

(базис) функциялари сонига ва икки каррали интегралларни ҳисоблашга нисбатан яқинлашишларни тадқиқ қилиши ҳамда тадқиқот натижаларни мавжуд ечимларга мувофиқлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти электромагнит майдон таъсири остидаги юпка мураккаб конструкциявий шаклдаги анизотроп пластиналарнинг геометрик нозичли деформацияланиш жараёнларининг янги масалаларини математик моделлаштириш услуби таклиф этилганлиги, аналитик R-функция усули ва вариацион Бубнов-Галеркин усулини биргаликда қўллаган ҳолда ҳисоблаш алгоритмини ишлаб чиқилганлиги, шунингдек мураккаб шаклли юпка анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик масаласини ечиш жараёнини автоматлаштириш дастурий мажмуасининг таркибий тузилмаси яратилганлиги билан баҳоланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти электромагнит мослашувликни ҳисобга олган ҳолда электромагнит майдони таъсирида бўлган замонавий ўлчов қурилмаларида ишлатиладиган, электр токини ўтказувчан материалдан тайёрланган юпка мураккаб конструктив микроэлементларини тежамкор қилиш ва ҳисоб-китобларни юритиш ишлари аниқлиги ва тезлигини ошириш, шунингдек электромагнит майдони таъсирида бўлган мазкур элементлар мустақамлигини ва эксплуатация қилганда ишончилигини узок муддатга яроқли бўлиши учун ишлаб чиқилган тавсиялар асосида пластинанинг мустақамлиги ҳолатини орттириш имкониятлари мавжудлиги билан баҳоланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Электромагнит майдон таъсирини ҳисобга олган ҳолда мураккаб шаклдаги юпка анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик деформацияланиш ҳолатини тадқиқ этиш учун ишлаб чиқилган математик модели, ҳисоблаш алгоритми ҳамда дастурий мажмуаси асосида:

электромагнит майдон таъсирини ҳисобга олган ҳолда юпка мураккаб шаклидаги микроэлементларнинг магнитэластиклик деформацияланиш жараёнларини ўрганишни автоматлаштириш учун ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритми ва дастурий мажмуа Қорақалпоғистон Республикаси «Электромагнит мослашув хизмати» тасарруфида бўлган ўлчов қурилмаларида ишлатиладиган электрўтказувчан материалдан тайёрланган юпка мураккаб конструкциявий микроэлементларнинг деформацияланиш жараёнини, мустақамлиги ҳолатларини тадқиқ қилиш мақсадида жорий этилган (Қорақалпоғистон Республикаси Нукус шаҳар ҳокимлигининг 05.10.2022 йил №03-04/201-сон маълумотномаси). Натижада, электромагнит мослашувчанликни ҳисобга олган ҳолда, электромагнит майдони таъсирида бўлган замонавий ўлчов қурилмаларида ишлатиладиган, электр токини ўтказувчан материалдан тайёрланган юпка мураккаб конструктив микроэлементларини тежамкорлигини ошириш ва ҳисоб-китобларни юритиш ишлари аниқлиги 1.2 марта, тезлиги эса 1.3 мартагача ошиб, вақт ва меҳнат сарфини 6-10 % га қисқартириш имконини берган.

электромагнит майдон кучларини ва ночизикли эластиклик назарияларини ҳисобга олган ҳолда юпқа мураккаб шаклдаги магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини математик модели, масалани ечиш учун яратилган ҳисоблаш алгоритми ҳамда дастурий мажмуаси «BEK INTER GROUP» МЧЖ қурилиш компанияси томонидан қурилиш-монтаж ишлари жараёнига жорий қилинган (Қорақалпоғистон Республикаси Нукус шаҳар ҳокимлигининг 05.10.2022 йил №03-04/201-сон маълумотномаси). Натижада, қурилиш конструкциясининг мустаҳкамлигини 6-7 % гача, ҳисоблаш аниқлиги 1.2 марта, ҳисоблаш тезлиги эса 1.5 мартагача ошириш ҳамда умумий қурилиш лойиҳасида ҳисоб-китоблар ишларининг сифати ва тезлиги 8-10% га орттириш имконини яратган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 3 та халқаро ва 11 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот мавзуси бўйича жами 25 та илмий иш чоп этилган бўлиб, жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг диссертациялар асосий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 9 та мақола, шулардан, 5 таси республика ва 4 таси хорижий журналларда нашр қилинган, ҳамда 2 та ЭҲМ учун яратилган дастурий воситаларни қайдлаш гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация иши кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 120 саҳифани ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусидаги долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган. Тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти ва предмети аниқланган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асослаб берилган, ишнинг назарий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши, нашр этилган илмий ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Электрўтказувчан эластик жисмларнинг деформацияланишини математик моделлаштириш бўйича тадқиқотлар таҳлили ва масаласининг қўйилиши**» деб номланган биринчи бобида илмий тадқиқот ишининг мақсади ва вазифаларини шакллантириш учун электромагнит майдон кучлари таъсиридаги электрўтказувчан жисмларнинг деформацияланиш масалаларини ўрганиш, жаҳонда кейинги йилларда ушбу соҳада олиб борилаётган илмий тадқиқотлар ҳолатини ва анизотроп эгилувчан пластиналарнинг деформацияланиш жараёнларини тадқиқ қилишга оид адабиётлар шарҳи келтирилган.

Илмий адабиётларнинг таҳлили шуни кўрсатадики, мазкур соҳада тадқиқ қилинган илмий ишларнинг кўпчилиги асосан геометрик шакли классик (айлана, квадрат, тўғри тўртбурчак) кўринишга эга бўлган эгилювчан пластиналарнинг деформацияланиш жараёнини ўрганишга бағишланган. Анизотроп ҳолда, мураккаб шаклли магнитэластик анизотроп пластинанинг геометрик ночизикли эгилиш масаласи деярли кўриб чиқилмаган бўлиб, бу эса диссертация иши мақсади ва вазифаларини шакллантириш имконини беради.

Диссертациянинг «Эгилювчан анизотроп юпқа электрўтказувчан пластиналарнинг магнитэластик деформацияланиш жараёнини математик моделлаштириш» деб номланган иккинчи боби ночизикли эластик назариялари ҳамда Гамильтон-Остроградский вариацион тамойили асосида юпқа мураккаб шаклдаги магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларида электромагнит майдон кучларини ҳисобга олган ҳолда математик моделини ишлаб чиқишга бағишланади.

Гамильтон-Остроградский вариацион тамойили асосида юпқа мураккаб конструкциявий шаклдаги магнитэластик пластинанинг геометрик ночизик деформацияланиш ҳолатига Коши муносабатлари, Гук қонуни ва Максвелл электромагнит тензор кўринишидан фойдаланиб, электромагнит майдон таъсирлари кўрилади. Натижада кўчишга нибатан бошланғич ва чегаравий шартларга эга хусусий ҳосилалар дифференциал тенгламалар тизими кўринишидаги математик модель олинади.

Гамильтон-Остроградский вариацион тамойили умумий кўриниши куйидагича ифодаланади:

$$\int_t (\delta K - \delta \Pi + \delta A) dt = 0. \quad (1)$$

бу ерда K – кинетик энергия, Π – потенциал энергия; A – ташқи кучлар бажарган иш.

Юпқа анизотроп пластинанинг ночизикли математик моделини келтириб чиқаришда кўчишнинг ўзгариш қонунлари сифатида куйидаги Кирхгоф-Ляв гипотезасидан фойдаланилади.

$$u_1 = u(x, y, t) - z \frac{\partial w}{\partial x}, u_2 = v(x, y, t) - z \frac{\partial w}{\partial y}, u_3 = w(x, y, t) \quad (2)$$

бу ерда: u, v, w – кўчишлар.

Гамильтон-Остроградский вариацион тамойилига асосан аниқланилган, кинетик ва потенциал энергиянинг ўзгариши ва электромагнит майдон кучларни ҳисобга олган ҳолда ташқи кучлар бажарган ишнинг вариацияларини келтириб ўрнига қўямиз. Натижада юпқа магнитэластик анизотроп пластиналар учун куйидаги бошланғич ва чегара шартларга эга бўлган ҳаракат тенгламалари тизими кўринишидаги математик модель ҳосил бўлади:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial N_{12}}{\partial y} + N_x + R_x + q_x + T_{zx} = 0, \\ -\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial N_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_{22}}{\partial y} + N_y + R_y + q_y + T_{zy} = 0, \\ -\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_{11} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial x} + N_{22} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial^2 M_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{22}}{\partial y^2} + N_z + R_z + q_z + T_{zz} = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Бошланғич шарт:

$$\left. \begin{array}{l} \rho h \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_t = 0, \rho h \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_t = 0, \rho h \frac{\partial w}{\partial t} \Big|_t = 0, \\ \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \Big|_{x|_t} = 0, \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial y} \Big|_{y|_t} = 0; \end{array} \right. \quad (4)$$

Чегаравий шарт:

$$\left. \begin{array}{l} N_{11} \delta u \Big|_x = 0, \frac{1}{2} N_{12} \delta v \Big|_x = 0, -M_{11} \delta \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_x = 0, -\frac{1}{2} M_{12} \delta \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_x = 0, \\ \left[N_{11} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial M_{11}}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial y} \right] \delta w \Big|_x = 0, \\ \left[(N_{Px} + N_{Txx}) \delta u + (N_{Py} + N_{Txy}) \delta v + (N_{Pz} + N_{Txz}) \delta w \right] \Big|_x = 0, \\ N_{22} \delta v \Big|_y = 0, \frac{1}{2} N_{12} \delta u \Big|_y = 0, -M_{22} \delta \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_y = 0, -\frac{1}{2} M_{12} \delta \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_y = 0, \\ \left[N_{22} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial M_{22}}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial x} \right] \delta w \Big|_y = 0, \\ \left[(N_{Fy} + N_{Tyx}) \delta u + (N_{Fx} + N_{Tyy}) \delta v + (N_{Fz} + N_{Tyx}) \delta w \right] \Big|_y = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

бу ерда u, v, w – пластинанинг эгилишлари; h – пластинанинг калинлиги; M_{11}, M_{22}, M_{12} – эгилиш ва бурилиш моментлари; N_{11}, N_{22}, N_{12} – нормал ва уринма кучлари, $R_x, R_y, R_z, N_x, N_y, N_z$ – электромагнит майдон ва ҳажмий кучлари; $T_{zx}, T_{zy}, T_{zz}, q_x, q_y, q_z$ – сирт кучларини ташкил этувчилари; $N_{Px}, N_{Py}, N_{Pz}, N_{Fx}, N_{Fy}, N_{Fz}, N_{Txx}, N_{Txy}, N_{Txz}, N_{Tyx}, N_{Tyy}, N_{Tyz}$ – контур кучларини ташкил этувчилари.

Энди ишлаб чиқилган математик моделдаги электромагнит майдон таъсири натижасида келиб чиққан кучлари, эгилиш ва бурилиш моментлари ҳамда нормал ва уринма кучлари аниқланади.

Умумий ҳажмий кучларга қўшилган электромагнит майдон таъсири натижасида келиб чиққан ҳажмий кучлар қуйидагича ифодаланади:

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

бу ерда $U(u, v, w)$ – кўчиш вектори, $H(H_x, H_y, H_z)$ – магнит майдон кучланиш вектори.

Пластинанинг сирт ва контур кучларига қўшилган электромагнит майдон таъсири натижасида келиб чиқадиган кучлар қуйидагича ифодаланади:

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

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

Юпқа анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик масаласини (3)-(5) геометрик нозикли математик моделидаги M_{11}, M_{22}, M_{12} – эгилиш ва бурилиш моментлари ва N_{11}, N_{22}, N_{12} – нормал ва уринма кучлари қуйидагича аниқланилади:

Биз тадқиқ қилаётган пластина анизотроп материаллигини ҳисобга олган ҳолда, Гук қонуни қуйидагича ифодаланади:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= B_{11}\varepsilon_{11} + B_{12}\varepsilon_{22} + B_{16}\varepsilon_{12}, \\ \sigma_{22} &= B_{12}\varepsilon_{11} + B_{22}\varepsilon_{22} + B_{26}\varepsilon_{12}, \\ \sigma_{12} &= B_{16}\varepsilon_{11} + B_{26}\varepsilon_{22} + B_{66}\varepsilon_{12}. \end{aligned} \quad (8)$$

бунда, $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}$ – деформация тензори компоненталари; $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$ – кучланиш тензори компоненталари; $B_{ij} (i, j = 1, 2, 6)$ – доимийлар (пластина материалнинг эластик коэффициентлари).

Бу ерда тадқиқ қилаётган пластина анизотроп материалдан тайёрланган бўлиб, бу ўз навбатида ортотроп ёки трансверсал-изотроп материал бўлиши мумкин. Мазкур ҳолатда $B_{ij} (i, j = 1, 2, 6)$ – пластина материалнинг эластик коэффициентлари қуйидагича аниқланилади:

Агар пластина *ортотроп* материалдан тайёрланган бўлса, унда $B_{ij} (i, j = 1, 2, 6)$ – пластина материалнинг эластик коэффициентлари:

$$\begin{aligned} B_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_1\nu_2}, \quad B_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_1\nu_2}, \quad B_{12} = \frac{\nu_2 E_1}{1 - \nu_1\nu_2} = \frac{\nu_1 E_2}{1 - \nu_1\nu_2}, \\ B_{66} &= G_{12}, \quad B_{16} = B_{26} = 0. \end{aligned}$$

Агар пластина *трансверсал-изотроп* материалдан тайёрланган бўлса, унда B_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$) – пластина материалнинг эластик коэффициентлари:

$$B_{11} = B_{22} = \frac{E}{1-\nu^2}, \quad B_{12} = \frac{\nu E}{1-\nu^2}, \quad B_{66} = G = \frac{E}{2(1-\nu)}, \quad B_{16} = B_{26} = 0.$$

Бунда E, E_1, E_2 – юнг модули; $\nu, \nu_1, \nu_2, \nu_{12}, \nu_{21}$ – Пуассон коэффициенти; G, G_{12} – силжиш модули.

Кирхгоф-Ляв гипотезасини ҳисобга олган ҳолда, Гук қонуни қуйидагича ифодаланади:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= B_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{12} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{16} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ \sigma_{22} &= B_{12} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{22} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{26} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ \sigma_{12} &= B_{16} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{26} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{66} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Мазкур (8)-(9) ларга асосланиб, анизотроп эгилувчан юпка пластиналар учун моментлар ва кучлар қуйидагича муносабатлар билан аниқланади:

$$\begin{aligned} N_{11} &= h \left[B_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{12} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{16} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \\ N_{22} &= h \left[B_{12} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{22} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{26} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \\ N_{12} &= h \left[B_{16} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{26} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{66} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \\ M_{11} &= -\frac{h^3}{12} \left(B_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2B_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + B_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\ M_{22} &= -\frac{h^3}{12} \left(B_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2B_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + B_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\ M_{12} &= -\frac{h^3}{12} \left(B_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2B_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + B_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Юқоридаги аниқланилган электромагнит майдон таъсири натижасида келиб чиққан ҳажмий кучлар (7)-(8) ҳамда моментлар ва кучлар (10)-(11)

математик моделдаги ўрниларига мос равишда келтириб қўйилади. Натижада электромагнит майдон кучлари таъсирини ҳисобга олган ҳолда юпқа магнитэластик анизотроп пластиналар учун математик моделининг умумий кўриниши келиб чиққан.

Диссертациянинг «**Мураккаб шаклдаги юпқа магнитэластик жисмларнинг чегаравий масалаларини ечишнинг ҳисоблаш алгоритми**» деб номланган учинчи боби мураккаб конструкциявий шаклдаги юпқа анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик масаласини сонли ечиш учун аналитик R-функция усули (RFM) ва вариацион Бубнов-Галеркин усулини биргаликда қўллаган ҳолда ҳисоблаш алгоритмини ишлаб чиқишга бағишланган.

Юқорида келтирилган (3)-(5) масаласини сонли ечиш учун аналитик RFM усули, Ньюмарк усули, вариацион Бубнов-Галеркин усули ва бир қанча сонли усулларни биргаликда қўллаган ҳолда ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган. Бунда масалаларни ечиш жараёни куйидаги босқичлардан иборат:

1. Ночизиқли хусусий ҳосилали дифференциал тенгламалар тизимларини ечишда чизиклантириш усулини қўллаш.

2. Берилган чегаравий шартларга мос келадиган координата функциялари кетма-кетлигини (ечимлар тузилмаларини) В.Л.Рвачевнинг R-функция ёрдамида қуриш.

3. Фазовий ўзгарувчиларга нисбатан дискретизация, дискрет тенгламалар яъни дискрет тенгламаларни Ньюмарк усули ва Бубнов-Галеркин вариацион усули ёрдамида қуриш.

4. Дискрет тенгламаларни ечиш ва ечимлар тузилмаларининг номаълум компоненталарини топиш.

5. Номаълум функцияларни аниқлаш. Пластина ўрта сиртининг тангенциал ва нормал кўчишларини аниқлаш.

Масалани юқоридаги босқичлар асосида итерацион сонли усуллар ёрдамида ечишда ҳар бир итерация учун $u_i(x, y, t), v_i(x, y, t)$ ва $w_i(x, y, t)$ функциялари аниқланади.

Итерация қадами $\max\{|u_i - u_{i-1}|, |v_i - v_{i-1}|, |w_i - w_{i-1}|\} \leq \varepsilon$ шарт бажарилгунча давом этади. Бу ерда ε – белгиланган аниқлик.

Диссертациянинг «**Мураккаб шаклдаги юпқа анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик масаласини ечишда ҳисоблаш тажрибалари**» деб номланган тўртинчи бобида юпқа мураккаб конструкциявий шаклдаги магнитэластик анизотроп пластиналарнинг геометрик ночизиқли масалаларини ечиш жараёнини автоматлаштириш дастурий мажмуаси ва унинг таркибий тузилмаси ишлаб чиқилган. Мураккаб конструкциявий шаклларга эга юпқа анизотроп магнитэластик пластиналар учун чегараларини маҳкамлаш ҳолатларини ҳисобга олган ҳолда тегишли чегаравий шартларда қўплаб ҳисоблаш тажрибалари ўтказилиб янги натижалар олинган ва таҳлил қилинган.

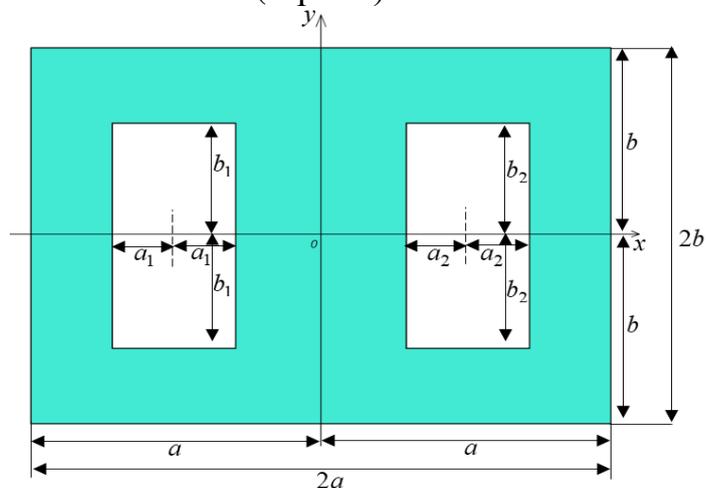
Ушбу дастурий мажмуанинг таркибий тузилмасидаги модуллар куйидаги схема кўринишида келтирилган (1-расм):



1-расм Дастурий мажмуанинг таркибий тузилмаси

Яратилган дастурий таъминот мажмуанинг ҳар бир қисми объектга йўналтирилган дастурлаш технологияси асосида яратилган бўлиб, унинг асосини “class”лар ташкил этади. Ушбу дастурий мажмуа юқори босқичли “Java” дастурлаш тилида ёзилган бўлиб, дастур интерфейси “JavaSwing” фреймворкида тузилган. Ишлаб чиқилган дастурий мажмуа MS WINDOWS операцион тизимининг барча версияларига мос тушади.

Ҳисоблаш тажрибаларини амалга ошириш учун мисол тариқасида трансформатор ишлаб чиқаришда фойдаланиладиган мураккаб шаклдаги юпқа анизотроп пластина олинган (2-расм).



2-расм. Мураккаб конструкциявий шаклга эга пластина

Дастлаб В.Л.Рвачевнинг R-функция усулидан фойдаланиб мураккаб соҳанинг (12) чегаравий тенгламаси ишлаб чиқилди.

$$\Omega = f_{12} \wedge f_{34} \wedge f_{56}. \quad (12)$$

Бунда:

$$f_1 = (a^2 - x^2) \geq 0, \quad f_2 = (b^2 - y^2) \geq 0,$$

$$f_{12} = f_1 \wedge f_2 = a^2 - x^2 + b^2 - y^2 - \sqrt{(a^2 - x^2)^2 + (b^2 - y^2)^2} \geq 0;$$

$$f_3 = \left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 - a_1^2 \right) \geq 0, \quad f_4 = (y^2 - b_1^2) \geq 0,$$

$$f_{34} = f_3 \wedge f_4 = \left(x - \frac{a}{2} \right)^2 - a_1^2 + y^2 - b_1^2 - \sqrt{\left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 - a_1^2 \right)^2 + (y^2 - b_1^2)^2} \geq 0;$$

$$f_5 = \left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 - a_2^2 \right) \geq 0, \quad f_6 = (y^2 - b_2^2) \geq 0,$$

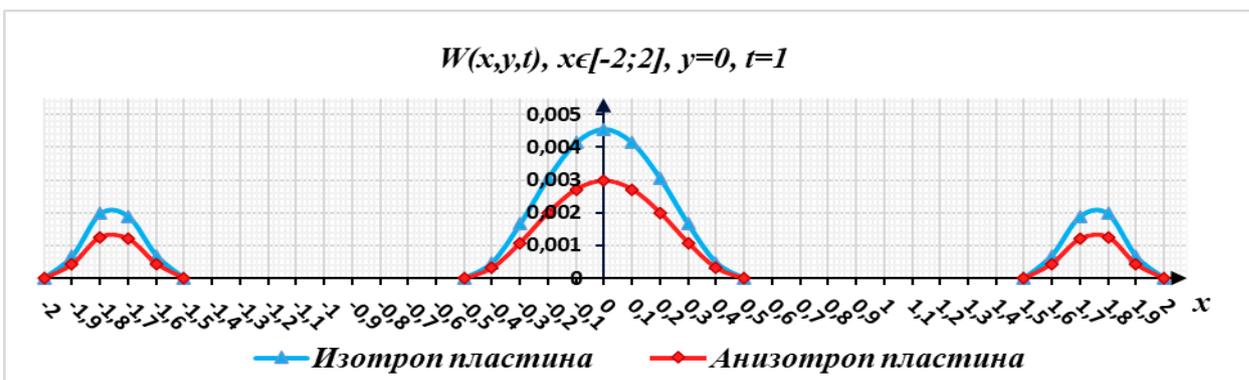
$$f_{56} = f_5 \wedge f_6 = \left(x + \frac{a}{2} \right)^2 - a_2^2 + y^2 - b_2^2 - \sqrt{\left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 - a_2^2 \right)^2 + (y^2 - b_2^2)^2} \geq 0.$$

Ўтказилган ҳисоблаш тажрибалари орқали юпқа мураккаб шаклдаги магнитэластик пластиналарнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёни тадқиқ қилинган. Ушбу ҳисоблаш тажрибаларида изотроп ҳолатда мисдан тайёрланган пластина, анизотроп ҳолатда эса анизотроп мисдан тайёрланган пластина олинган бўлиб, қуйидаги геометрик ва механик параметрларда ҳисоблаш тажрибалари ўтказилган:

$$a = 2, b = 1, a_1 = 0.5, a_2 = 0.5, b_1 = 0.7, b_2 = 0.7, t = 1c, H_x = H_y = H_z = 10кЭ, \\ Q_1 = Q_2 = Q_3 = 10, E = 128ГПа, \nu = 0.3, E_1 = 322.09ГПа, E_2 = 357.73ГПа, \\ \nu_1 = 0.2386, \nu_2 = 0.2762.$$

Бунда: a, a_1, a_2, b, b_1, b_2 – геометрик параметрлар, $t = 1c, H_x, H_y, H_z, Q_1, Q_2, Q_3$ – механик параметрлар, E, ν – мис учун Юнг модули ва Пуассон коэффициенти, E_1, E_2, ν_1, ν_2 – анизотроп мис учун Юнг модули ва Пуассон коэффициенти.

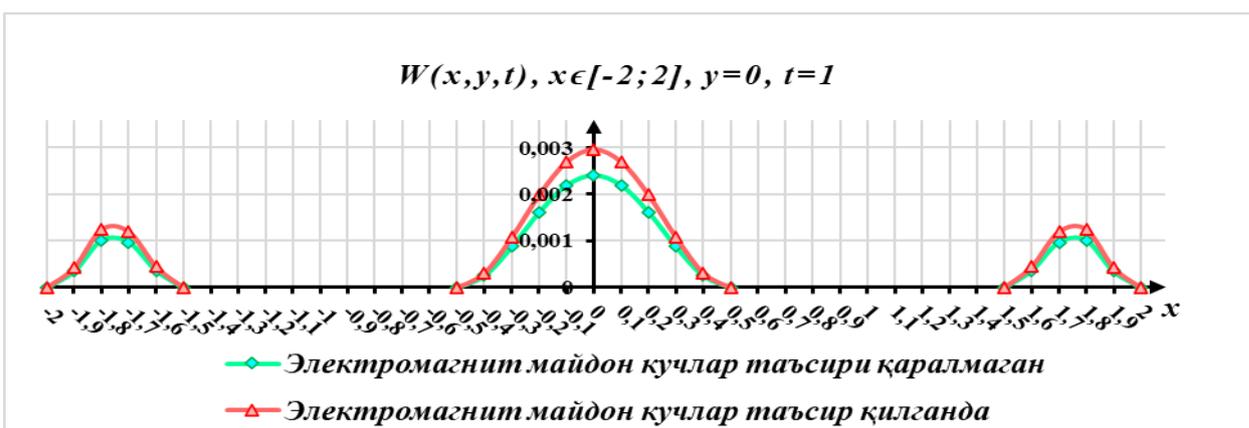
1-ҳисоблаш тажрибаси. Мазкур тадқиқотда чегаралари каттик маҳкамланган пластина изотроп (мис) ёки анизотроп (анизотроп мис) бўлганда электромагнит майдон кучлари таъсири остида деформацияланиш ҳолатларининг ўзгариши ўрганилган, яъни Oz ўқи бўйлаб $x \in [-2; 2], y = 0, t = 1$ қийматларида $w(x, y, t)$ кўчиш функциясининг натижалари олинди (3-расм).



3-расм. Изотроп ва анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик ҳолатлари график таҳлили

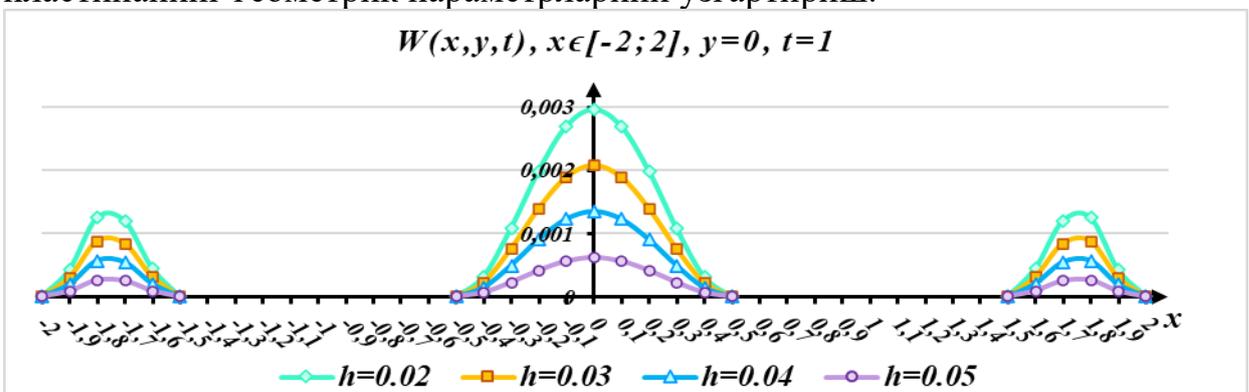
Тадқиқот натижалари шуни кўрсатадики пластина анизотроп бўлганда изотропга нисбатан эгилишларининги ўзаро фарқи 34%гачани ташкил этади.

2-ҳисоблаш тажрибаси. Юпқа мураккаб шаклдаги анизотроп пластиналарнинг геометрик нозичикли деформацияланиш жараёнида электромагнит майдон кучлари таъсири ўрганиш учун ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди (4-расм). Мазкур ҳисоблаш тажрибаси натижаларидан юпқа анизотроп пластинанинг OZ ўқи бўйлаб эгилишига электромагнит майдон кучларининг таъсири 19% эканлиги маълум бўлди.



4-расм. Электромагнит майдон кучларнинг юпқа мураккаб шаклдаги анизотроп пластинага таъсири.

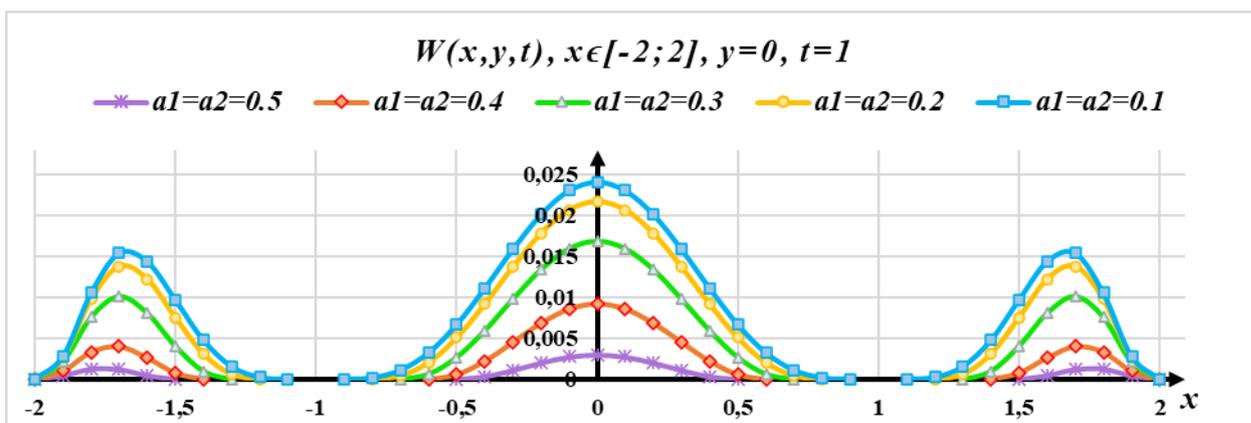
3-ҳисоблаш тажрибаси. Мураккаб шаклдаги юпқа анизотроп пластинанинг геометрик параметрларини ўзгартириш.



5-расм. Пластина қалинлигининг ўзгариши график таҳлили.

Юқоридаги ҳисоблаш тажрибасидан юпқа мураккаб шаклдаги анизотроп пластинанинг қалинлиги $h=0,02$, $h=0,03$, $h=0,04$ ва $h=0,05$ бўлганда қуйидаги натижалар олинди (5-расм). Бунда мазкур олинган натижалардан пластина қалинлигининг камайиши билан мос равишда унинг эгилишини ортиши маълум бўлди.

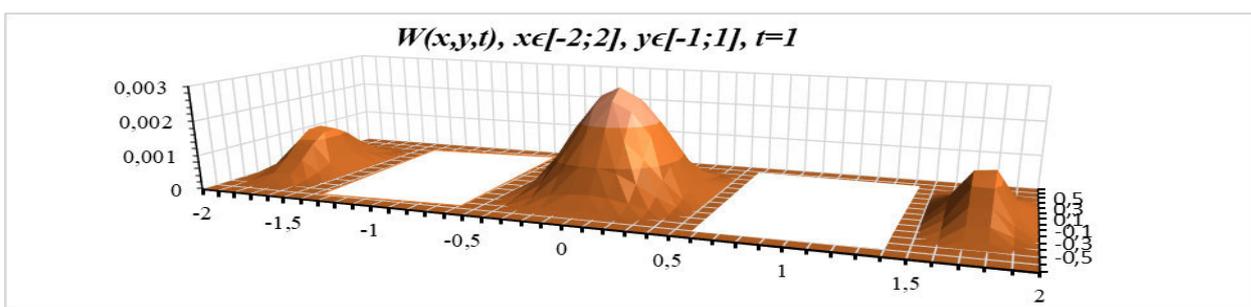
4-ҳисоблаш тажрибаси. Тадқиқ қилинаётган пластинани кесиб турган иккита тўғри тўртбурчакларнинг ўлчамлари турли ҳолатларда тажрибалар ўтказилди ва натижалар олинди (6-расм).



6-расм. Пластинанинг геометрик ўлчамлари ўзгариши таҳлили.

Мазкур ҳисоблаш тажрибаси орқали $h=0,02$ қалинликга эга бўлган пластинани кесиб турган иккита тўғри тўртбурчакларнинг ўлчамлари камайиши билан эгилишини ортиши аниқланди.

5-ҳисоблаш тажрибаси. Мазкур тадқиқотда, чегаралари қаттиқ маҳкамланган юпқа мураккаб шаклдаги анизотроп магнитэластик пластинанинг эгилиши 3Д ҳолатда натижалари олинган (7-расм).



7-расм. Юпқа мураккаб шаклдаги анизотроп пластинанинг магнитэластиклик ҳолатининг 3Д тасвири.

Ҳисоблаш тажрибаларида юпқа мураккаб (симметрик ва носимметрик) шаклдаги (изотроп ва анизотроп) пластиналарнинг геометрик ночизиқли деформацияланиш жараёнига электромагнит майдон кучлари таъсирини ўрганиш учун ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди ва олинган натижалар таҳлил қилинди. Тадқиқот натижалари шуни кўрсатадики, электромагнит майдон кучлари юпқа магнитэластик анизотроп пластиналарнинг деформацияланиш жараёнига таъсири кичик бўлсада мавжудлиги аниқланди.

ХУЛОСА

«Мураккаб шаклдаги юпқа анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик деформацияланиш ҳолатини математик моделлаштириш» мавзусидаги диссертация иши юзасидан олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Диссертация ишининг мақсади ва вазифаларини шакллантириш учун мазкур соҳада кейинги йиллардаги дунёда, эгилувчан ҳамда электр ўтказувчан жисмларнинг магнитэластиклик масалаларини математик моделлаштириш, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларининг янги авлодларини ишлаб чиқиш юзасидан етарлича илмий тадқиқот ишлари таҳлил қилинди.

2. Электромагнит майдонда жойлашган юпқа анизотроп пластиналар тебраниш масаласининг математик модели ишлаб чиқилди. Бунда Гамильтон-Остроградский вариацион тамойили асосида Кирхгоф-Ляв гипотезаси, Коши муносабатлари, Гук қонуни ҳамда Максвелл электромагнит тензор кўринишларидан фойдаланиб, потенциал энергия, кинетик энергия ва ташқи кучлар бажарган ишнинг вариацион кўринишлари аниқланди. Натижада кўчишга нибатан бошланғич ва чегаравий шартларга эга, хусусий ҳосилали ночизиқли дифференциал тенгламалар тизими кўринишидаги математик модели олинди.

3. Тадқиқ қилинаётган масалани сонли ечиш учун мураккаб конструкциявий шаклдаги магнит-эластик пластиналарни аналитик R -функция усули, вариацион Бубнов-Галеркин усули ва бир қанча сонли усулларни биргаликда қўллаган ҳолда ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди.

4. Мураккаб шаклли эгилувчан анизотроп пластиналарнинг деформацияланиш жараёнларини ўрганишни автоматлаштирадиган дастурий мажмуаси яратилган. Мазкур дастурий мажмуаси электромагнит кучларининг таъсирини ҳисобга олган ҳолда, мураккаб шаклдаги юпқа ҳар хил материалдан тайёрланган (изотроп, анизотроп) пластиналарнинг геометрик ночизиқли деформацияланиш масалаларини ечиш ва кўплаб ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш ҳамда эришилган натижаларни таҳлил қилиш имконини берди.

5. Мураккаб шаклдаги юпқа анизотроп пластиналарнинг магнитэластиклик деформацияланиш ҳолатини тўлиқ тадқиқ қилиш мақсадида етарлича илмий тажрибалар ўзказилди. Бунда турли чегаравий шартларда, ҳар хил симметрик ва носимметрик мураккаб шакллардаги изотроп ва анизотроп пластиналар учун ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди ва олинган натижалар таҳлил қилинди.

6. Тадқиқот иши натижалари Қорақалпоғистон Республикаси “Электромагнит мослашув хизмати” ва “BEK INTER GROUP” МЧЖ қурилиш компанияси ҳамда Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетининг БВ-М-Ф4-004 “Функционал жадваллар алгебраси асосида мураккаб тизимлар бошқаришини алгоритмлаштириш принципларини ишлаб чиқиш” илмий-тадқиқот лойиҳасида жорий этилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2021.Т.142.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАЗВИТИЯ
ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

АРТИКБАЕВ МАХКАМ АРТИКБАЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ МАГНИТОУПРУГИХ ТОНКИХ АНИЗОТРОПНЫХ
ПЛАСТИН СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2022.4.PhD/T3002.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.airi.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Нуралиев Фахриддин Муродиллаевич
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Полатов Асхад Мухамеджанович
доктор физико-математических наук, профессор

Индиаминов Равшан Шукурович
доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация:

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Защита диссертации состоится « 21 » декабрь 2022 г. в 14:00 часов на заседании Научного совета DSc.I3/30.12.2021.T.142.01 при Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. (Адрес: 100125, г. Ташкент, р. М.Улугбекский, Буз-2, дом 17А. Тел.: (99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (регистрационный номер № 20). (Адрес: 100125, г. Ташкент, М.Улугбекский р-н, Буз-2, дом 17А. Тел.: (99871) 263-41-98).

Автореферат диссертации разослан « 6 » декабрь 2022 года.
(протокол рассылки № 26 от « 22 » ноябрь 2022 г.).



CSB

Н.С. Маматов

Председатель научного совета
по присуждению учёных степеней,
доктор технических наук, профессор

R. Nadic

Н.О. Рахимов

Ученый секретарь научного совета
по присуждению учёных степеней,
доктор технических наук

[Signature]

Н. Равшанов

Председатель научного семинара при научном
совете по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор

Введение (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Во всем мире гибкие анизотропные тонкие пластины широко используются в различных областях техники. Они являются важными конструктивными элементами в строительстве, судостроении, машиностроении, производстве различных измерительных приборов и других отраслях. При производстве технических устройств важное значение приобретает исследование изменения состояний базового элемента в результате взаимодействия электромагнитных и механических полей на основе информационно-коммуникационных технологий. Разработка алгоритмов вычисления, программных комплексов и математических моделей процессов деформации тонких магнитоупругих анизотропных пластин сложной формы с учетом сил электромагнитного поля является значимой в странах мира, развитых в этой области, в том числе в США, Российской Федерации, Китае, Японии, Турции, Южной Корее, Иране, Армении, Индии и др.

В мире в последние годы большое внимание уделяется развитию математических моделей при изучении состояния деформации материалов с учетом анизотропных свойств таких как конструктивных элементов, пластины и оболочки. В частности, в анизотропных материалах большое значение имеют различные физико-механические свойства структурных элементов. Особое внимание ученые всего мира уделяют разработке вычислительных алгоритмов и программных комплексов для решения задач математического моделирования, магнитоупругости процессов воздействия на состояние деформации электропроводящих пластин и оболочек структурных микроэлементов электромагнитных полей.

В Республике проводится ряд исследований по изучению вопросов деформации электропроводящих тел, которые считаются конструктивными элементами современных технических устройств, создаются новые возможности для осуществления широкомасштабных исследовательских работ в этой области. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены такие задачи как «...внедрение информационно-коммуникационных технологий в экономику, социальную сферу, систему управления, развитие и модернизацию инженерно-коммуникационной и социальной инфраструктуры». В связи с этим, одной из важнейших задач является исследование состояния деформации магнитоупругих тонких анизотропных пластин сложной формы с учетом влияния электромагнитного поля и разработка программного комплекса, автоматизирующего процесс решения задач такого типа.

Данное диссертационное исследование в определенной мере служит осуществлению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года №УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениями Президента Республики Узбекистан от 27 апреля 2018 года №ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического

внедрения инновационных идей, технологий и проектов», от 20 сентября 2019 года №ПП-4464 «О мерах по широкому внедрению информационно-коммуникационных технологий в сферу строительства», от 10 февраля 2021 года №ПП-4986 «О мерах по привлечению инвестиций в дальнейшее развитие информационных технологий и коммуникаций».

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с направлением развития науки и технологий республики: IV. «Информатизация и развития информационно-коммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. В мире научные исследования, посвященные вопросам изучения деформационных процессов под воздействием электромагнитного поля упругих тел, математического моделирования магнитоупругости, электромагнетизма, термоэлектромагнитоупругих деформаций элементов конструкций в виде пластин и оболочек, нашли отражение в работах таких ученых как F.Ebrahimi, M.R.Barati, A.Dabbagh, M.Karimiasl, N.M.Faleh, M.R.Garcia, M.Hosseini, A.Jamalpoor, A.Ahmadi-Savadkoohi, G.Altay, R.K.Bhangale, T.Buchukuri, Yu Li Jiang, H.L.Dai, Y.L.Qu, G.Y.Zhang, Z. Sharifi, M. Vinyas, Z.J.Wang, D.Hasanyan, A.Barakati, В.Л.Рвачев, Л.В.Курпа, Ю.С.Шкенеv, С.А.Амбарцумян, Г.Е.Багдасарян, М.В.Белубекян, Д.И.Бардзокас, Л.В.Мольченко, И.Т.Селезов, М.Р.Короткина и др.

В Республике вопросы упругости гибких и электропроводящих тел, математического моделирования т.е. создания линейных и нелинейных математических моделей, разработки алгоритмов вычисления и программных комплексов процессов магнитоупругой деформации тонких пластин и оболочек сложной формы рассматривались в научных трудах отечественных исследователей, в частности в работах Х.А.Рахматулина, В.Кабулова, Т.Буриева, К.Ш.Бобомурадова, Ф.Б.Бадалова, Б.Курманбаева, Ш.А.Назирова, Т.Юлдашева, А.М.Полатов, А.А.Халджигитов, Р.Ш.Индиаминова, Ф.М.Нуралиева, Ш.А.Анаровой.

Анализ научных исследований в этой области показывает, что геометрическая форма пластин в рамках рассматриваемых работ имеет классический вид. В аспекте анизотропии проблемы математического моделирования процессов геометрической нелинейной деформации анизотропной пластины сложной формы на сегодняшний день недостаточно изучены.

Связь темы диссертационного исследования с научно-исследовательскими работами высшего учебного заведения, в котором выполняется диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и искусственного интеллекта и Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий по следующим темам:

А-ОТ-2021-108 «Создание информационно-аналитического программного продукта для мониторинга и прогнозирования экологической ситуации в регионе Приаралья» (2021-2022), ИЛ-4721071198 «Создание национальной виртуальной университетской системы информационных технологий на основе 3D-технологий» (2022).

Целью исследования является разработка математического моделирования, алгоритма вычисления и структурной структуры программного комплекса геометрических нелинейных деформационных процессов магнитоупругих анизотропных пластин сложной конфигурации с учетом сил электромагнитного поля.

Задачи исследования:

провести анализ литературы по изучаемой области с целью формулирования целей и задач научно-исследовательской работы;

разработать математическую модель процессов геометрической нелинейной деформации тонких магнитоупругих анизотропных пластин сложной формы с учетом сил электромагнитного поля, теорий нелинейной упругости и анизотропных свойств материала;

разработать алгоритм вычисления решения задачи геометрической нелинейной деформации тонких магнитоупругих анизотропных пластин сложной формы численными методами;

разработать структуру программного комплекса, автоматизирующего исследование процессов деформации тонких магнитоупругих анизотропных пластин сложной формы;

провести анализ и вычислительные эксперименты по соответствующим краевым условиям с учетом случаев фиксации границ для тонких анизотропных магнитоупругих пластин со сложной конструкцией.

Объектом исследования является состояние магнитоупругой деформации тонких анизотропных пластин сложной формы.

Предмет исследования - математические модели, численные и аналитические методы, алгоритмы расчета и программный комплекс для исследования геометрических нелинейных деформаций тонких анизотропных пластин сложной формы с учетом воздействия электромагнитного поля.

Методы исследования. В ходе исследования при математическом моделировании использованы вариационные принципы и гипотезы, основанные на теории упругости, численные методы решения системы дифференциальных уравнений высокого уровня с частными производными, а также современные технологии объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана математическая модель процессов геометрической нелинейной деформации тонких магнитоупругих анизотропных пластин на основе вариационного принципа Гамильтона-Остроградского с учетом сил электромагнитного поля и теорий нелинейной упругости;

разработан алгоритм вычисления с совместным использованием аналитического метода R-функций (RFM), вариационных методов Бубнова-Галеркина и численных методов для численного решения магнитоупругих анизотропных пластин тонкой сложной конструктивной формы;

разработана структура программного комплекса, автоматизирующего исследование процессов деформирования гибких анизотропных пластин сложной формы на основе алгоритма вычисления, метода RFM, вариационного метода Бубнова-Галеркина, методов Ньюмарка и Гаусса;

проведены вычислительные эксперименты по соответствующим краевым условиям с учетом обстоятельств фиксации их границ, а также получены и проанализированы практические результаты для тонких анизотропных магнитоупругих пластин со сложной структурой.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан алгоритм вычисления с совместным использованием метода R-функций (RFM), метода Ньюмарка, вариационного метода Бубнова-Галеркина и ряда методов для численного решения задачи геометрической нелинейной деформации тонких магнитоупругих анизотропных пластин сложной конструкции;

разработан программный комплекс для автоматизации процесса решения геометрических нелинейных задач магнитоупругих анизотропных пластин тонкой сложной структурной формы;

исследованы новые вопросы геометрических нелинейных деформаций тонких магнитоупругих пластин сложной формы с учетом воздействия электромагнитного поля и анизотропных свойств материала.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования обусловлена тем, что постановка задачи и разработка ее математической модели опирается на вариационный принцип Гамильтона-Остроградского, исследован алгоритм вычисления, разработанного на основе совместного применения метода R-функций, вариационного метода Бубнова-Галеркина, метода Ньюмарка и ряда численных методов, при решении задачи и приближении данного алгоритма к числу координатных (базовых) функций и вычислению двойных интегралов, а также соответствия результатов исследования доступным решениям.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования обоснована тем, что предложен метод математического моделирования новых задач геометрических нелинейных деформационных процессов тонких анизотропных пластин сложной структурной формы под воздействием электромагнитного поля, разработан алгоритм вычисления с совместным применением аналитического метода R-функций (RFM) и вариационного метода Бубнова-Галеркина, также разработана структурная программного комплекса для автоматизации процесса решения задачи магнитоупругости тонких анизотропных пластин сложной формы.

Практическая значимость результатов исследований обоснована в оптимальности тонких микроэлементов сложной конструкции, изготовленных из электропроводящего материала, которые используются в современных измерительных приборах, подверженных воздействию электромагнитного поля, с учетом электромагнитной совместимости, повышении точности и скорости вычислительных работ, а также наличие возможностей для повышения прочности пластин на основе рекомендаций, разработанных для обеспечения автономности и надежности этих элементов под воздействием электромагнитного поля в течение длительного времени.

Внедрение результатов исследования. На основе математической модели, алгоритма вычисления и программного комплекса, разработанных для исследования состояния магнитоупругой деформации тонких анизотропных пластин сложной формы с учетом воздействия электромагнитного поля:

алгоритм расчета и программный комплекс для автоматизации исследования процессов магнитоупругой деформации тонких микроэлементов сложной формы с учетом воздействия электромагнитного поля внедрены в деятельность «Службы электромагнитной совместимости» Республики Каракалпакстан с целью изучения состояний деформации и прочности тонких микроэлементов сложной структуры из электропроводящих материалов, используемых в измерительных приборах (справка хокимията города Нукуса Республики Каракалпакстан от 05 октября 2022 года №03-04/201). В результате с учетом электромагнитной совместимости, точность работ по составлению и ведению расчетов тонких микроэлементов со сложной структурой из электропроводящего материала, используемых в современных измерительных приборах, подверженных воздействию электромагнитного поля, повысилась в 1,2 раза, а скорость увеличилась в 1,3 раза, что позволяет сократить время и трудоемкость на 6-10%;

математическая модель процессов геометрического нелинейного деформирования магнитоупругих тонких анизотропных пластин сложной формы, учитывающая силы электромагнитного поля и теории нелинейной упругости, алгоритм вычисления и программный комплекс, созданные для решения задачи, внедрены в процесс строительно-монтажных работ строительной компании ООО «BEK INTER GROUP» (справка хокимията города Нукуса Республики Каракалпакстан от 05 октября 2022 года №03-04/201). В результате применения программного комплекса предложенная математическая модель позволила увеличить прочность строительной конструкции на 6-7%, точность вычисления в 1,2 раза и скорость вычисления в 1,5 раза с учетом внутренних и внешних факторов, а также повышение качества и скорости на 8-10 %.

Апробация результатов исследования. Теоретические и практические результаты диссертационной работы обсуждались на 3 международных и 11 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме исследования опубликованы 25 научных работ, из них 9 научных статей, в том числе 4 в зарубежных, 5 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, а также получены 2 авторских свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений и содержит 120 страницы текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определены цель и задачи, объект и предмет исследования, приводится соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна, практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрывается теоретическая и практическая значимость результатов исследования, приведены внедрение результатов исследования, сведения об опубликованности результатов и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ исследований по математическому моделированию деформаций электропроводящих упругих тел и постановка задачи»** для формирования целей и задач научной работы исследованию проблем деформируемости проводящих тел, подверженных воздействию сил электромагнитного поля, рассматривается статус научных исследований в этой области в последние годы в мире, приводится обзор научной литературы по исследованию процессов деформации анизотропных гибких пластин.

Анализ научной литературы показывает, что большая часть научных работ, изученных в этой области, посвящена в основном изучению процесса деформации гибких пластин, геометрическая форма которых имеет классический (круг, квадрат, прямоугольник) внешний вид. В случае анизотропии вопрос о геометрическом нелинейном изгибе анизотропной магнитоупругой пластины сложной формы практически не рассматривается, что позволяет сформулировать цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава диссертации **«Математическое моделирование процесса магнитоупругой деформации гибких анизотропных тонких проводящих пластин»** посвящена разработке математической модели процессов геометрически нелинейной деформации магнитоупругих тонких пластин сложной формы с учетом силы электромагнитного поля на основе теорий нелинейной упругости и вариационного принципа Гамильтона-Остроградского.

На основе вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, применяя соотношения Коши, закон Гука и тензор электромагнитного поля Максвелла к состоянию геометрически нелинейной деформации тонкой магнитоупругой пластины сложной формы, рассматривается воздействие электромагнитного поля. Результатом является математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений с частными производными с начальными и краевыми условиями применительно к миграции.

Общий вид вариационного принципа Гамильтона-Остроградского выражается следующим образом:

$$\int_t (\delta K - \delta \Pi + \delta A) dt = 0. \quad (1)$$

где K – кинетическая энергия, Π – потенциальная энергия; A – воздействие внешних сил.

При выводе нелинейной математической модели тонкой анизотропной пластины в качестве законов изменения перемещений используется следующая гипотеза Кирхгофа-Лява:

$$u_1 = u(x, y, t) - z \frac{\partial w}{\partial x}, u_2 = v(x, y, t) - z \frac{\partial w}{\partial y}, u_3 = w(x, y, t) \quad (2)$$

где u, v, w – перемещения.

В соответствии с вариационным принципом Гамильтона-Остроградского подставляются вариации воздействия внешних сил, определяемых с учетом изменения кинетической и потенциальной энергии, а также сил электромагнитного поля. В результате получается математическая модель для тонких магнитоупругих анизотропных пластин в виде системы уравнений движения со следующими начальными и краевыми условиями:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial N_{12}}{\partial y} + N_x + R_x + q_x + T_{zx} = 0, \\ -\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial N_{12}}{\partial x} + \frac{\partial N_{22}}{\partial y} + N_y + R_y + q_y + T_{zy} = 0, \\ -\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_{11} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial x} + N_{22} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial^2 M_{11}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{22}}{\partial y^2} + N_z + R_z + q_z + T_{zz} = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Начальное условие:

$$\begin{aligned} \rho h \frac{\partial u}{\partial t} \delta u \Big|_t = 0, \rho h \frac{\partial v}{\partial t} \delta v \Big|_t = 0, \rho h \frac{\partial w}{\partial t} \delta w \Big|_t = 0, \\ \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \delta w \Big|_{x|_t} = 0, \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial y} \delta w \Big|_{y|_t} = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

Краевое условие:

$$\begin{aligned} N_{11} \delta u \Big|_x = 0, \frac{1}{2} N_{12} \delta v \Big|_x = 0, -M_{11} \delta \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_x = 0, -\frac{1}{2} M_{12} \delta \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_x = 0, \\ \left[N_{11} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial M_{11}}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial y} \right] \delta w \Big|_x = 0, \\ \left[(N_{Px} + N_{Txx}) \delta u + (N_{Py} + N_{Txy}) \delta v + (N_{Pz} + N_{Txz}) \delta w \right] \Big|_x = 0, \\ N_{22} \delta v \Big|_y = 0, \frac{1}{2} N_{12} \delta u \Big|_y = 0, -M_{22} \delta \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_y = 0, -\frac{1}{2} M_{12} \delta \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_y = 0, \\ \left[N_{22} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{2} N_{12} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial M_{22}}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial x} \right] \delta w \Big|_y = 0, \\ \left[(N_{Fy} + N_{Tyx}) \delta u + (N_{Fx} + N_{Tyy}) \delta v + (N_{Fz} + N_{Tyz}) \delta w \right] \Big|_y = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где u, v, w – изгибы пластины; h – толщина пластины; M_{11}, M_{22}, M_{12} – изгибающие и огибающие моменты; N_{11}, N_{22}, N_{12} – нормальные и касательные напряжения; $R_x, R_y, R_z, N_x, N_y, N_z$ – электромагнитное поле и объемные силы; $T_{zx}, T_{zy}, T_{zz}, q_x, q_y, q_z$ – компоненты внешних сил; $N_{Px}, N_{Py}, N_{Pz}, N_{Fx}, N_{Fy}, N_{Fz}, N_{Txx}, N_{Txy}, N_{Txz}, N_{Tyx}, N_{Tyy}, N_{Tyz}$ – компоненты контурных сил.

Теперь в разработанной математической модели определены силы, вызванные действием электромагнитного поля, моменты изгибов, а также нормальные и касательные напряжения.

Объемные силы, вызванные действием электромагнитного поля, добавленные к общим объемным силам, выражаются следующим образом:

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

где $U(u, v, w)$ – вектор смещения; $H(H_x, H_y, H_z)$ – вектор напряжения магнитного поля.

Силы, возникающие в результате действия электромагнитного поля, соединенные с внешними и контурными силами пластины, выражаются следующим образом:

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

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

Задача магнитоупругости тонких анизотропных пластин (3) - (5) M_{11}, M_{22}, M_{12} - изгибающие моменты в геометрически нелинейной математической модели и N_{11}, N_{22}, N_{12} - нормальные и касательные напряжения определяются следующим образом:

С учетом того, что исследуемые пластины из анизотропного материала закон Гука выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= B_{11}\varepsilon_{11} + B_{12}\varepsilon_{22} + B_{16}\varepsilon_{12}, \\ \sigma_{22} &= B_{12}\varepsilon_{11} + B_{22}\varepsilon_{22} + B_{26}\varepsilon_{12}, \\ \sigma_{12} &= B_{16}\varepsilon_{11} + B_{26}\varepsilon_{22} + B_{66}\varepsilon_{12}. \end{aligned} \quad (8)$$

где $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}$ - компоненты тензора деформации; $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}$ - компоненты тензора натяжения; $B_{ij} (i, j = 1, 2, 6)$ - константы (коэффициенты упругости пластины).

Пластины, которые исследуются в исследовании, изготовлены из анизотропного материала, который, в свою очередь, может быть ортотропным или поперечно-изотропным материалом. Определение коэффициентов упругости $B_{ij} (i, j = 1, 2, 6)$ - пластинчатого материала в этом случае определяется следующим образом:

Если пластина изготовлена из *ортотропного* материала, то коэффициенты упругости $B_{ij} (i, j = 1, 2, 6)$ материала пластины:

$$\begin{aligned} B_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_1 \nu_2}, \quad B_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_1 \nu_2}, \quad B_{12} = \frac{\nu_2 E_1}{1 - \nu_1 \nu_2} = \frac{\nu_1 E_2}{1 - \nu_1 \nu_2}, \\ B_{66} &= G_{12}, \quad B_{16} = B_{26} = 0. \end{aligned}$$

Если пластина изготовлена из *трансверсально-изотропного* материала, то коэффициенты упругости $B_{ij} (i, j = 1, 2, 6)$ материала пластины:

$$B_{11} = B_{22} = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad B_{12} = \frac{\nu E}{1 - \nu^2}, \quad B_{66} = G = \frac{E}{2(1 - \nu)}, \quad B_{16} = B_{26} = 0.$$

где E, E_1, E_2 – модуль Юнга; $\nu, \nu_1, \nu_2, \nu_{12}, \nu_{21}$ – коэффициент Пуассона; G, G_{12} – модуль сдвига.

Принимая во внимание гипотезу Киркгофа-Лява, закон Гука выражается следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= B_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{12} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{16} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ \sigma_{22} &= B_{12} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{22} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{26} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ \sigma_{12} &= B_{16} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{26} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{66} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right).\end{aligned}\quad (9)$$

Основываясь на (8)-(9), моменты и силы для анизотропных гибких тонких пластин определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}N_{11} &= h \left[B_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{12} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{16} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \\ N_{22} &= h \left[B_{12} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{22} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{26} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \\ N_{12} &= h \left[B_{16} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right) + B_{26} \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) + B_{66} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \\ M_{11} &= -\frac{h^3}{12} \left(B_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2B_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + B_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\ M_{22} &= -\frac{h^3}{12} \left(B_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2B_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + B_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\ M_{12} &= -\frac{h^3}{12} \left(B_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2B_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + B_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right).\end{aligned}\quad (11)$$

Объемные силы (7)-(8), а также моменты и силы (10)-(11), возникшие под воздействием вышеуказанного определенного электромагнитного поля, индуцируются в соответствии с их позицией в математической модели. Результатом служит появление математической модели для тонких магнитоупругих анизотропных пластин, учитывающей влияние электромагнитного поля.

Третья глава диссертации «**Алгоритм вычисления для решения граничных задач тонких магнитоупругих тел сложной формы**» посвящена разработке алгоритма вычисления для численного решения задачи магнитоупругости тонких анизотропных пластин сложной формы на основе совместного применения аналитического метода R-функций (RFM) и вариационного метода Бубнова-Галеркина.

Для численного решения вышеуказанной задачи (3)-(5) был разработан алгоритм вычисления с совместным использованием метода RFM-анализа, метода Ньюмарка, вариационного метода Бубнова-Галеркина и ряда других численных методов. При этом процесс решения задач состоит из следующих этапов:

1. Применение метода линеаризации при решении систем нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными.

2. Построение последовательности координатных функций (структур решений), соответствующих заданным краевым условиям, с использованием R-функции В.Л.Рвачева.

3. Дискретизация относительно пространственных переменных, т.е. построение дискретных уравнений, с использованием метода Ньюмарка и вариационного метода Бубнова-Галеркина.

4. Решение дискретных уравнений и нахождение неизвестных компонентов структур решений.

5. Идентификация неизвестных функций. Определение тангенциальных и нормальных перемещений средней поверхности пластины.

При решении задачи с использованием итерационных численных методов, основанных на вышеуказанных шагах, функции $u_i(x, y, t)$, $v_i(x, y, t)$ и $w_i(x, y, t)$ определяются для каждой итерации отдельно.

Этап итерации $\max\{|u_i - u_{i-1}|, |v_i - v_{i-1}|, |w_i - w_{i-1}|\} \leq \varepsilon$ будет продолжаться до тех пор, пока не будет выполнено условие, где ε – заданная точность.

В четвертой главе диссертации «**Вычислительные эксперименты по решению задачи магнитоупругости тонких анизотропных пластин сложной формы**» разработан программный комплекс для автоматизации процесса решения геометрических нелинейных задач магнитоупругости тонких анизотропных пластин сложной формы и ее структуры. Для тонких анизотропных магнитоупругих пластин со сложными структурными формами проведено множество вычислительных экспериментов по соответствующим граничным условиям с учетом фиксации их границ, соответственно получены и проанализированы результаты этих экспериментов.

Модули структуры данного программного комплекса представлены в виде следующей схемы (рис.1):

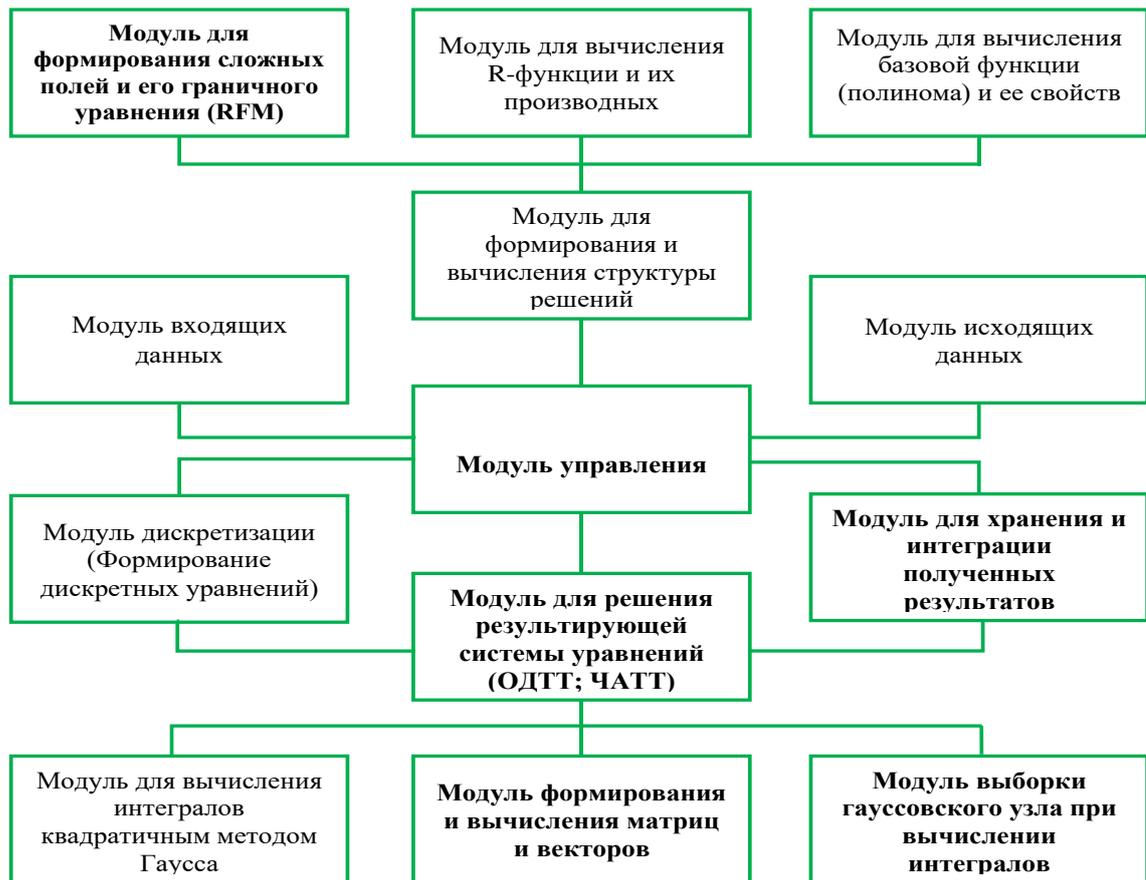


Рис.1. Составная структура программного комплекса.

Каждый элемент разработанного программного обеспечения создан на основе технологии объектно-ориентированного программирования, основой которой составляют "class"ы. Этот программный комплекс написан на высокоуровневом языке программирования "Java", а программный интерфейс настроен во фрейме "JavaSwing". Разработанный программный комплекс совместим со всеми версиями операционной системы MS WINDOWS.

В качестве примера для реализации вычислительных экспериментов была взята тонкая анизотропная пластина сложной формы, которая используется при изготовлении трансформатора (рис.2).

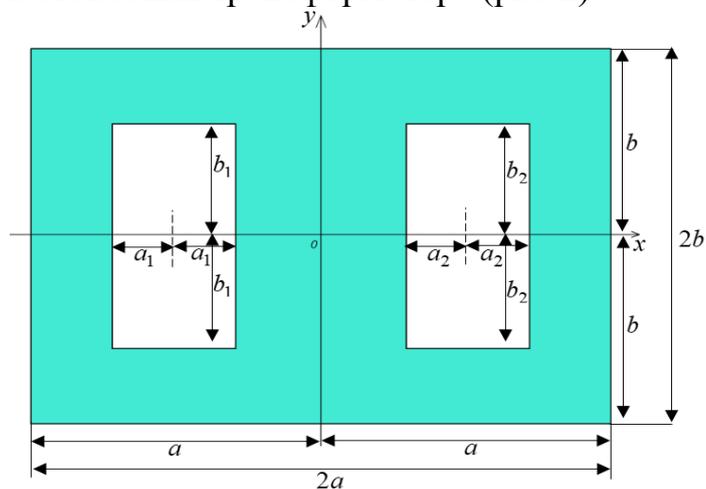


Рис. 2. Пластина со сложной формой.

Вначале, используя метод R-функции В.Л.Рвачева, разработано краевое уравнение комплексной сферы (12).

$$\Omega = f_{12} \wedge f_{34} \wedge f_{56}. \quad (12)$$

где:

$$f_1 = (a^2 - x^2) \geq 0, \quad f_2 = (b^2 - y^2) \geq 0,$$

$$f_{12} = f_1 \wedge f_2 = a^2 - x^2 + b^2 - y^2 - \sqrt{(a^2 - x^2)^2 + (b^2 - y^2)^2} \geq 0;$$

$$f_3 = \left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 - a_1^2 \right) \geq 0, \quad f_4 = (y^2 - b_1^2) \geq 0,$$

$$f_{34} = f_3 \wedge f_4 = \left(x - \frac{a}{2} \right)^2 - a_1^2 + y^2 - b_1^2 - \sqrt{\left(\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 - a_1^2 \right)^2 + (y^2 - b_1^2)^2} \geq 0;$$

$$f_5 = \left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 - a_2^2 \right) \geq 0, \quad f_6 = (y^2 - b_2^2) \geq 0,$$

$$f_{56} = f_5 \wedge f_6 = \left(x + \frac{a}{2} \right)^2 - a_2^2 + y^2 - b_2^2 - \sqrt{\left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 - a_2^2 \right)^2 + (y^2 - b_2^2)^2} \geq 0.$$

С помощью проведенных вычислительных экспериментов был исследован процесс геометрически нелинейной деформации магнитоупругих пластин тонкой сложной формы. В этих вычислительных экспериментах рассматривались пластина, изготовленная из меди, в изотропном состоянии, а и пластина, изготовленная из анизотропной меди, в анизотропном состоянии. Вычислительные эксперименты были проведены при следующих геометрических и механических параметрах:

$$a = 2, b = 1, a_1 = 0.5, a_2 = 0.5, b_1 = 0.7, b_2 = 0.7, t = 1c, H_x = H_y = H_z = 10кЭ,$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = 10, E = 128ГПа, \nu = 0.3, E_1 = 322.09ГПа, E_2 = 357.73ГПа,$$

$$\nu_1 = 0.2386, \nu_2 = 0.2762.$$

где a, a_1, a_2, b, b_1, b_2 – геометрические параметры; $t = 1c, H_x, H_y, H_z, Q_1, Q_2, Q_3$ – механические параметры; E, ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона для меди; E_1, E_2, ν_1, ν_2 – модуль Юнга и коэффициент Пуассона для анизотропной меди.

Вычислительный эксперимент 1. В данной работе рассматривалось изменение состояний деформации под воздействием электромагнитного поля, когда края зафиксированы изотропной (медной) или анизотропной (анизотропно-медной) пластиной, т.е. результаты функции сдвига $w(x, y, t)$ были получены при значениях $x \in [-2; 2], y = 0, t = 1$ вдоль оси Oz (рис. 3).

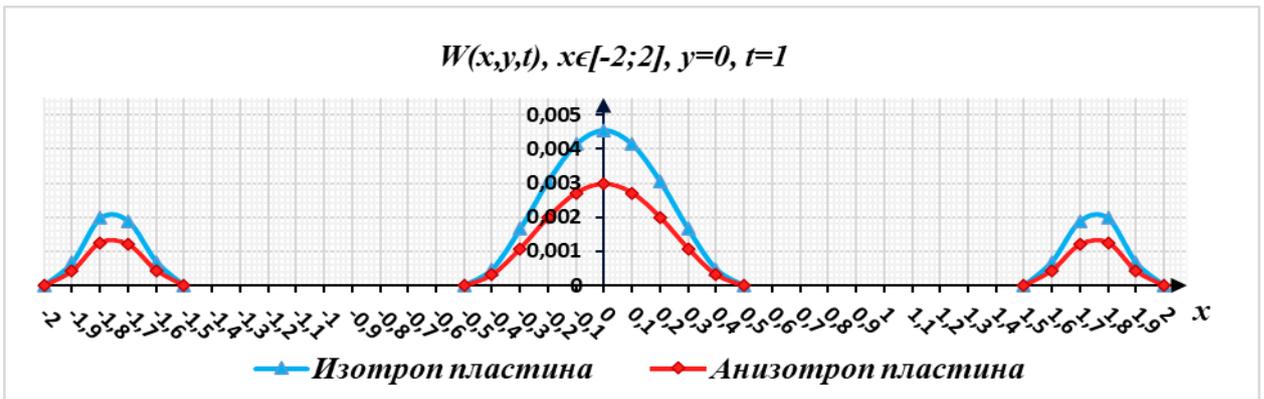


Рис.3. Графический анализ случаев электромагнитной упругости изотропных и анизотропных пластин.

Результаты исследования показывают, что при анизотропности пластины, расхождения в изгибах относительно изотропной пластины составляет 34%.

Вычислительный эксперимент 2. Проведен вычислительный эксперимент по изучению воздействия электромагнитного поля в процессе геометрически нелинейной деформации тонких анизотропных пластин сложной формы (рис. 4). Результаты свидетельствуют, что воздействие электромагнитного поля на изгиб тонкой анизотропной пластины вдоль оси Oz составляет 19%.

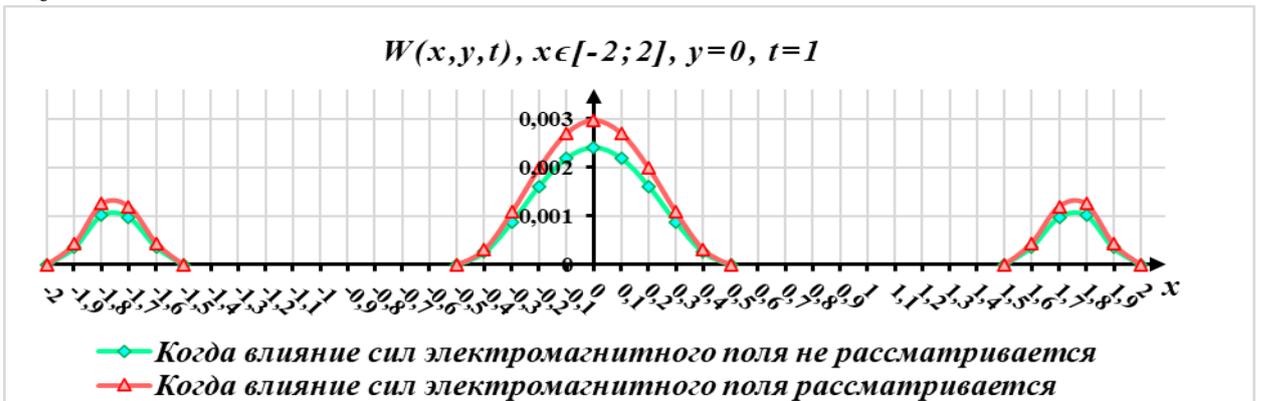


Рис.4. Воздействие электромагнитного поля на тонкую анизотропную пластину сложной формы.

Вычислительный эксперимент 3. Изменение геометрических параметров тонкой анизотропной пластины сложной формы.

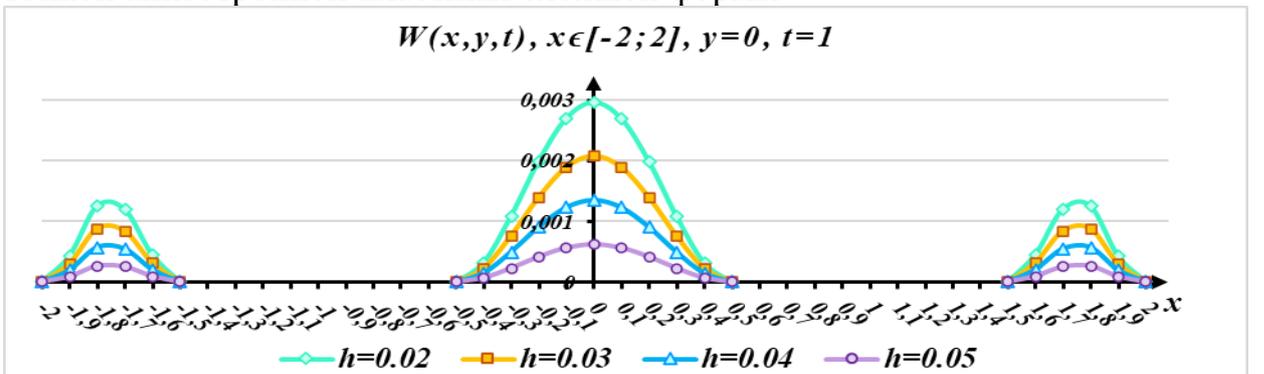


Рис.5. Графоанализ изменения толщины пластины.

Получены следующие результаты, когда толщина тонкой анизотропной пластины сложной формы составляла $h=0,02$, $h=0,03$, $h=0,04$ и $h=0,05$ (рис.5). Из полученных результатов стало известно, что с уменьшением толщины пластины соответственно увеличивается ее изгиб.

Вычислительный эксперимент 4. Проведены эксперименты, связанные с размерами двух прямоугольников, пересекающих исследуемую пластину, и получены соответствующие результаты (рис. 6).

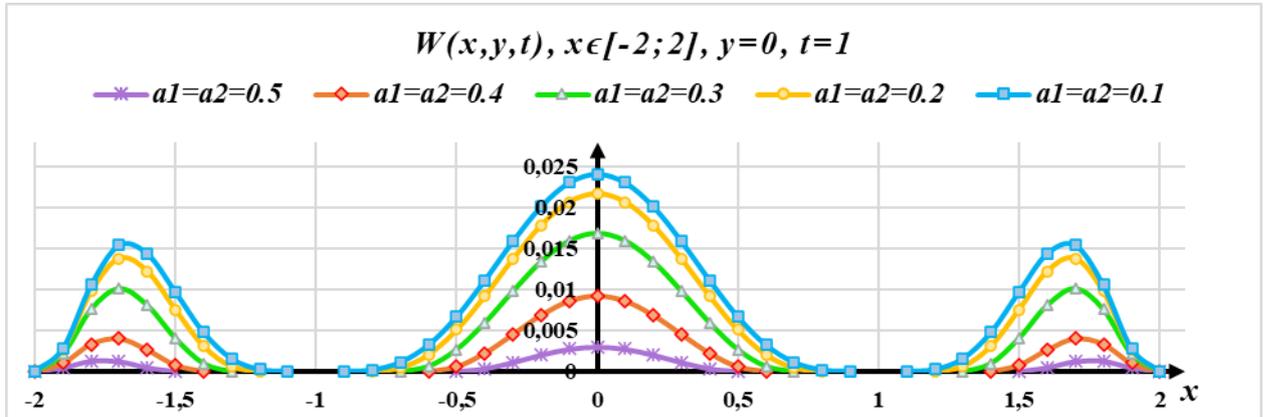


Рис.6. Анализ изменений геометрических размеров пластины.

Данный эксперимент показал, что два прямоугольника, разрезающие пластину толщиной $h = 0,02$, увеличивают изгиб с уменьшением размера.

Вычислительный эксперимент 5. В этом эксперименте получены результаты изгиба тонкой анизотропной пластины сложной формы из магнитоэластика, границы которой жестко зафиксированы, в 3D-измерении (рис.7).

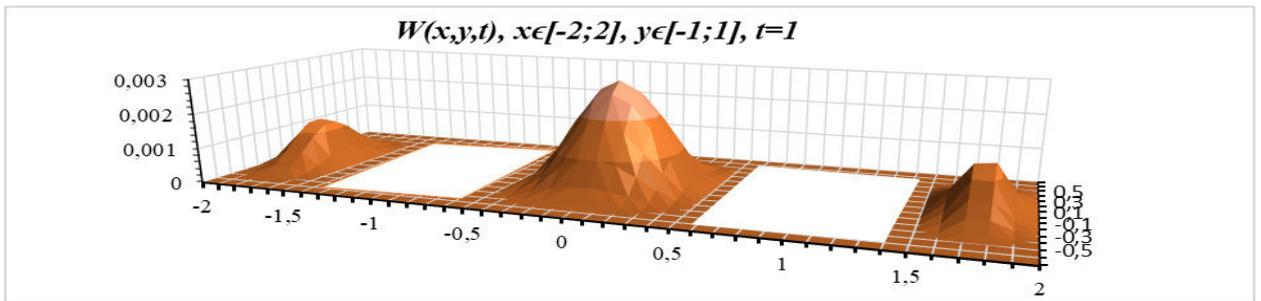


Рис.7. 3D-изображение состояния магнитоупругости тонкой анизотропной пластины сложной формы.

В рамках данных вычислительных экспериментов получены и проанализированы результаты воздействия электромагнитного поля на процесс геометрически нелинейной деформации тонких пластин сложной (симметричной и несимметричной) формы (изотропной и анизотропной). Результаты исследования показывают, что воздействие электромагнитного поля, как было обнаружено, существуют даже тогда, когда влияние тонких магнитоупругих анизотропных пластин на процесс деформации было небольшим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования, проведенного по диссертационной работе на тему «Математическое моделирование деформированного состояния магнитоупругих тонких анизотропных пластин сложной формы», представлены следующие выводы:

1. Для формирования цели и задачи диссертации проанализирована научная литература, посвященная разработке новых поколений математического моделирования, вычислительных алгоритмов и программных средств решения задач магнитоупругости гибких и электропроводящих тел в мире в последние годы.

2. Разработана математическая модель колебаний тонких анизотропных пластин, расположенных в электромагнитном поле. При этом определены вариационные проявления работы, выполняемой потенциальной энергией, кинетической энергией и внешними силами на основе вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, с использованием гипотезы Киркгофа-Лява, соотношений Коши, закона Гука, тензора электромагнитного поля Максвелла. В результате получена математическая модель в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений со частными производными, имеющих начальные и краевые условия применительно к сдвигу.

3. Для численного решения исследуемой проблемы разработан алгоритм вычисления магнитоупругих пластин сложной структурной формы на основе совместного использования аналитического метода R-функций, вариационного метода Бубнова-Галеркина и ряда численных методов.

4. Разработан программный комплекс, автоматизирующий исследование процессов деформации гибких анизотропных пластин сложной формы. Этот программный комплекс, учитывающий влияние электромагнитных сил, позволил решить задачи геометрической нелинейной деформации тонких пластин, изготовленных из различных материалов сложной формы (изотропных, анизотропных) и провести множество вычислительных экспериментов, а также проанализировать полученные результаты.

5. Проведено достаточное количество научных экспериментов, для того, чтобы полностью изучить состояние магнитоупругой деформации тонких анизотропных пластин сложной формы. При этом проведены вычислительные эксперименты для изотропных и анизотропных пластин различной симметричной и несимметричной сложной формы, при различных краевых условиях, и проанализированы полученные результаты.

6. Результаты научной работы внедрены в деятельность Службы электромагнитной совместимости Республики Каракалпакстан, строительной компании города Нукуса ООО «BEK INTER GROUP» и научно-исследовательский проект БВ-М-Ф4-004 «Разработка принципов алгоритмизации управления сложными системами на основе алгебры функциональных таблиц» Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.13/30.12.2021.T.142.01 AT RESEARCH INSTITUTE FOR
DEVELOPMENT OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL
INTELLIGENCE**

**RESEARCH INSTITUTE FOR DEVELOPMENT OF DIGITAL
TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

ARTIKBAYEV MAHKAM ARTIKBAYEVICH

**MATHEMATICAL MODELING OF THE DEFORMATE STATE OF
MAGNETOELASTIC THIN ANISOTROPIC PLATES OF COMPLEX
FORM**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and program complexes

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent – 2022

The topic of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD) in technical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under the number B2022.4.PhD/T3002.

The dissertation was completed at the Research Institute for the Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence.

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

Scientific consultant: **Nuraliev Fakhriddin Murodillaevich**
Doctor of Technical Sciences, Docent

Official opponents: **Polatov Askhad Mukhamedjanovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Indiaminov Ravshan Shukurovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent

Leading organization: **Tashkent state technical university named after Islam Karimov**

The defense will take place « 21 » december 2022 at 14:00 the meeting of Scientific council No. DSc.13/30.12.2021.T.142.01 at Research institute for development of digital technologies and artificial intelligence (Address: 100125, Tashkent city, M.Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of the Research institute for development of digital technologies and artificial intelligence (is registered under № 20). (Address: 100125, Tashkent city, M.Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98).

Abstract of dissertation sent out on « 6 » december 2022 y.
(mailing report № 26 on « 22 » november 2022 y.).



CSP

N.S. Mamatov
Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

R. Raximov

N.O. Raximov
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences

Ravshanov

N. Ravshanov
Chairman of the scientific seminar under
the scientific council awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research is to develop mathematical modeling, calculation algorithm and structural structure of the software package of geometric nonlinear deformation processes of magnetoelastic anisotropic plates of complex configuration taking into account the forces of the electromagnetic field.

The object of the research is cases of magneto elasticity deformation of thin anisotropic plates of complex shape.

The scientific novelty of the research is as follows:

the mathematical model of the processes of geometric nonlinear deformation of thin magnetoelastic anisotropic plates was developed based on the Hamilton-Ostrogradsky variation principle, taking into account the forces of the electromagnetic field and theories of nonlinear elasticity;

the calculation algorithm was developed using the analytical method of R-functions (RFM), variational methods of Bubnov-Galerkin and numerical methods together for the numerical solution of magnetoelastic anisotropic plates of thin complex structural shape;

the composite structure of a software package was created that automates the study of the deformation processes of flexible anisotropic plates of complex shape based on the calculation algorithm, the RFM method, the Bubnov-Galerkin variational method, the Newmark and Gauss methods;

computational experiments were carried out on the corresponding boundary conditions, taking into account the circumstances of fixing their boundaries, and practical results were obtained and analyzed for thin anisotropic magnetoelastic plates with complex structural shapes.

Implementation of obtained results. Based on developed mathematical model, calculation algorithm and software complex to research the state of magnetoelastic deformation of thin anisotropic plates of complex shape, taking into account the influence of the electromagnetic field:

the computational algorithm and the software complex for automating the study of the processes of magnetoelastic deformation of microelements of thin complex shape, taking into account the influence of an electromagnetic field, were introduced in order to study the process of deformation and strength of complex structural microelements from a conductive material used in measuring instruments within the framework of the "Electromagnetic compatibility service" of the Republic of Karakalpakstan (Reference No. 03-04/201 of the Nukus City Hall of the Republic of Karakalpakstan, 05.10.2022). As a result, taking into account electromagnetic compatibility, the accuracy of the work on compiling and maintaining calculations of thin complex structural microelements from an electrically conductive material used in modern measuring instruments exposed to an electromagnetic field is 1.2 times, and the speed increased by 1.3 times, which allows to reduce time and labor intensity by 6-10%;

the mathematical model of the processes of geometric nonlinear deformation of magnetoelastic anisotropic plates of thin complex shape, taking into account the forces of the electromagnetic field and the theory of nonlinear elasticity, the calculation algorithm and the software complex created to solve the problem, were introduced into the process of construction and installation works by the construction company LLC "BEK INTER GROUP" (reference No. 03-04/201 of the city of Nukus, 05.10.2022). As a result of the application of the software package, the proposed mathematical model made it possible to increase the strength of the building structure up to 6-7%, the calculation accuracy by 1.2 times and the calculation speed up to 1.5 times, taking into account internal and external factors, as well as to improve quality and speed by 8-10%.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, references and appendices. The dissertation volume is 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Нуралиев Ф.М., Сафаров Ш.Ш., Артикбаев М.А. Деформацияланган магнитэластик пластинанинг математик модели ва ҳисоблаш алгоритми. // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». –Ташкент, 2020. – № 5. –С. 38-49. (05.00.00; №5)
2. Nuraliev F.M., Aytmuratov B. S. and Artikbayev M. A. Solving the vibration of magnetic elastic plates with sophisticated form // 2019 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2019, pp. 1-4. (05.00.00; 30.09.2019 №269/8-сон раёсат қарори)
3. Nuraliev F. M., Safarov Sh. Sh., Artikbayev M. A. A computational algorithm for calculating the effect of the electromagnetic fields to thin complex configured plates // 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2020, pp. 1-4. (05.00.00; 30.10.2020 №287/9-сон раёсат қарори).
4. Nuraliev F.M., Aytmuratov B.Sh., Artikbayev M.A. Mathematical model and computational algorithm of vibration processes of thin magnetoelastic plates with complex form // 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2021, pp. 01-05. (05.00.00; 30.10.2021 №308/6-сон раёсат қарори).
5. Nuraliev F., Safarov Sh., Artikbayev M. Solving the problem of geometrical nonlinear deformation of electro-magnetic thin plate with complex configuration and analysis of results // 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2021, pp. 01-05. (05.00.00; 30.10.2021 №308/6-сон раёсат қарори).
6. Артикбаев М.А. Электромагнитэластик юпқа анизотроп пластиналарнинг тебраниш масаласини математик моделини ишлаб чиқиш // «Фан ва жамият» журнали, Нукус-2021, № 4/1. – Б. 3-7. (05.00.00; №37).
7. Artikbayev M.A., Nuraliev F.M., Aytmuratov B.Sh. Mathematical model and computational algorithm for calculating vibrations of electromagnetic anisotropic thin plates of complex form // Science and Education in Karakalpakstan. – Nukus, 2022. – № 1/2(23). – Pp. 31-40. (05.00.00; №27).
8. Nuraliev F.M., Aytmuratov B.Sh., Safarov Sh.Sh., Artikbaev M.A. Mathematical modeling of geometric nonlinear processes of electromagnetic elastic thin plates of complex configuration // Problems of computational and applied mathematics. – Tashkent, 2022. – № 1(38). – Pp. 90-109. (05.00.00; №23).
9. Артикбаев М.А. Юпқа мураккаб шаклдаги анизотроп пластиналарнинг электромагнитэластиклик геометрик нозизиқли деформацияланиш масаласини ечиш натижалари // Муҳаммад Ал-Хоразмий Авлодлари. – 2022. - №3(21)/2022.- 237-241 бет. (05.00.00; №10)

II бўлим (II часть; II part)

10. Нуралиев Ф.М., Сафаров Ш.Ш., Артикбаев М.А. Вычислительный алгоритм расчета магнитоупругих гибких пластин сложной конфигурацией // XV Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. 2019 г, Российской Федерации, С. 41-49.
11. Нуралиев Ф.М., Артикбаев М.А., Сафаров Ш.Ш. Мураккаб конструктив шаклдаги юпка магнитэластик пластинанинг геометрик нозичикли деформацияланиш жараёнини ҳисоблаш // “Фан, таълим ва техникани инновацион ривожлантириш масалалари” мавзусидаги Ҳалқаро илмий-амалий онлайн анжуман, 12 апрель, 2022 йил, Андижон, Б. 311-314.
12. Нуралиев Ф.М., Сафаров Ш.Ш., Артикбаев М.А. Эгилувчан магнит-эластик пластина масаласини ечишнинг ҳисоблаш алгоритми // “Иқтисодийнинг тармоқларини инновацион ривожланишида Ахборот-коммуникация технологияларининг аҳамияти” мавзусидаги Республика илмий-техник анжуман, 5-6 март, 2020 йил, Тошкент, Б. 73-76.
13. Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш., Артикбаев М.А. Электромагнит майдонда жойлашган юпка пластинка учун магнитэластик масаласининг математик модели // “Математиканинг замонавий муаммолари” мавзусидаги Республика илмий онлайн-анжуман, Нукус, 2020. – Б. 246-247.
14. Айтмуратов Б.Ш., Артикбаев М.А. Электромагнит майдондаги юпка пластинкаларнинг тебраниш масалаларини эчишда R-функция усули ёрдамида мураккаб соҳанинг чегаравий тенгламасини қуриш // “Ахборот технологияларининг замонавий муаммолари ҳамда уларнинг ечимлари” мавзусидаги республика онлайн илмий-амалий анжуман, Урганч, 2020. – Б. 433-435.
15. Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш., Сафаров Ш.Ш., Артикбаев М.А. Деформацияланган магнитэластик пластинанинг математик моделлари ва ҳисоблаш алгоритми // “Математик моделлаштириш, ҳисоблаш математикаси ва дастурий таъминот инженериясининг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий – амалий анжума, 23-24 октябрь, 2020 йил. Қарши. Б. 72-76.
16. Нуралиев Ф.М., Айтмуратов Б.Ш., Артикбаев М.А., Сафаров Ш.Ш. Юпка мураккаб шаклдаги анизотроп пластиналарнинг электромагнитэластиклик деформацион-кучланиш ҳолатини математик моделлаштириш // Республиканской научно-технической конференции Современное состояние и перспективы применения цифровых технологий и искусственного интеллекта в управлении, 6-7 сентября 2021 г. Ташкент. С. 120-129.
17. Айтмуратов Б.Ш., Артикбаев М.А. Анизотроп юпка пластиналарнинг электромагнит эластиклик масаласини ечишни ҳисоблаш алгоритми // “Фан ва таълимда замонавий компьютерли дастурлаштириш, телекоммуникацион технологияларнинг бугунги замон кўриниши ва

- уларни ўқитишда инновацион ёндашиш масалалари” мавзусидаги Республика илмий-техник анжуман, Нукус, 2021. – Б. 13-15.
18. Артикбаев М.А. Эгилувчан анизотроп юпқа пластиналарнинг электромагнит эластиклик масаласи // “Фан ва таълимда замонавий компьютерли дастурлаштириш, телекоммуникацион технологияларнинг бугунги замон кўриниши ва уларни ўқитишда инновацион ёндашиш масалалари” мавзусидаги Республика илмий-техник анжуман, Нукус, 2021. – Б. 56-67.
 19. Нуралиев Ф.М. Айтмурадов Б.Ш, Артикбаев М.А., Сафаров Ш.Ш. Эгилувчан анизотроп пластиналарнинг электромагнит эластик деформацияланиш жараёнини математик моделлаштириш // “Замонавий ахборот, коммуникация технологиялари ва ат-таълим татбиқи муаммолари” мавзусидаги республика илмий-амалий анжуман, 24-25 ноябр, 2021. Самарқанд. Б. 24-26.
 20. Нуралиев Ф.М. Сафаров Ш.Ш. Артикбаев М.А. Мураккаб конфигурацияли электро магнитэластик юпқа пластинканинг геометрик чизиксиз деформацияланиш масаласини ечиш // “Замонавий ахборот, коммуникация технологиялари ва ат-таълим татбиқи муаммолари” мавзусидаги республика илмий-амалий анжума, 24-25 ноябр 2021, Самарқанд. Б. 27-29.
 21. Нуралиев Ф.М., Артикбаев М.А., Сафаров Ш.Ш. Электромагнит майдонда жойлашган юпқа мураккаб шаклли анизотроп пластиналарнинг электромагнитэластик масалаларини математик модели ва ҳисоблаш алгоритми // “Замонавий ахборот, коммуникация технологиялари ва ат-таълим татбиқи муаммолари” мавзусидаги республика илмий-амалий анжуман, 9 апрель 2022, Самарқанд, Б. 92-94.
 22. Nuraliev F., Safarov Sh., Artikbayev M., Abdirozikov O. Calculation results of the task of geometric nonlinear deformation of electro-magneto-elastic thin plates in a complex configuration // 2022 International Conference on Information Science and Communications Technologies. – 2022, pp. 1-4.
 23. Нуралиев Ф.М. Айтмурадов Б.Ш, Артикбаев М.А. Юпқа мураккаб конструкциявий шаклдаги анизотроп пластиналарнинг электромагнитэластик масаласини ечиш // Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта: сборник трудов республиканской научно-технической конференции. – Ташкент: НИИРЦТИИ, 2022, С. 297-304.
 24. Нуралиев Ф.М., Артикбаев М.А., Сафаров Ш.Ш. Программа для ЭВМ. «Программа для расчета воздействия деформированной магнитоупругой пластины на электромагнит поле» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 09292. 28.09.2020 г.
 25. Сафаров Ш.Ш, Нуралиев Ф.М., Артикбаев М.А.. Программа для ЭВМ. «Calculation of geometric nonlinear deformation of magnetoelastic thin plates of complex configuration» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство № DGU 15583. 24.03.2022 г.

Автореферат «Информатика ва энергетика муаммолари» Ўзбекистон
журнали таҳририясида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз
тилларидаги матнларини мослиги текширилди.