

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

---

**JIZZAX DAVLAT PEDAGOGIKA UNIVERSITETI**

**XOLJIGITOV SOBIR MAMARAPOVICH**

**MAGNIT MAYDONIDA AYLANMA PARABOLOID SHAKLIDAGI  
QOBIQNING MAGNITOELASTIK DEFORMATSIYALANISHI**

**01.02.04 – Deformasiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (Doctor of Philosophy) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Buxoro–2024**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
avtoreferati mundarijasi**

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

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

**Xoljigitov Sobir Mamaraupovich**

Magnit maydonida aylanma paraboloid shaklidagi qobiqning magnitoelastik  
deformatsiyalanishi..... 3

**Холжигитов Собир Мамараупович**

Магнитоупругое деформирование параболоида вращения в магнитном  
поле..... 21

**Kholjigitov Sobir**

Magnetoelastic deformation of a paraboloid of revolution in a magnetic  
field..... 39

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 44

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

---

**JIZZAX DAVLAT PEDAGOGIKA UNIVERSITETI**

**XOLJIGITOV SOBIR MAMARAPOVICH**

**MAGNIT MAYDONIDA AYLANMA PARABOLOID SHAKLIDAGI  
QOBIQNING MAGNITOELASTIK DEFORMATSIYALANISHI**

**01.02.04 – Deformasiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (Doctor of Philosophy) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Buxoro–2024**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertasiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestasiya komissiyasida №B2023.4.PhD/FM963 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertasiya Jizzax davlat pedagogika universitetida bajarilgan.

Dissertasiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) institut veb-sahifasida ([www.buxmti.uz](http://www.buxmti.uz)) va «Ziyonet» axborot ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Indiaminov Ravshan Shukurovich**  
fizika-matematika fanlari doktori (DSc), professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Xodjabekov Muradjon Usarovich**  
fizika-matematika fanlari doktori (DSc), dotsent

**Sagdiyev Xamidulla**  
texnika fanlari nomzodi, dotsent.

**Yetakchi tashkilot:**

**“Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” Milliy tadqiqot universiteti**

Dissertasiya himoyasi Buxoro muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi PhD.03/27.02.2021.FM.101.02 raqamli Ilmiy kengashning 2024 yil 24 dekabr soat 14<sup>00</sup> dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100118, Buxoro shahar, Qayum Murtazoyev ko'chasi, 15. Tel.: (+99865) 223-78-84; faks: (+99865) 223-78-84, e-mail: [bmti\\_info@edu.uz](mailto:bmti_info@edu.uz)).

Dissertasiya bilan Buxoro muhandislik-texnologiya institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ 335 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100118, Buxoro shahar, Qayum Murtazoyev ko'chasi, 15. Tel.: (+99865) 223-78-84).

Dissertasiya avtoreferati 2024 yil 12 dekabr kuni tarqatildi.

(2024-yil 6 noyabrdagi № 9 raqamli reyestr bayonnomasi).



**M.X. Teshayev**

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

**Z.I. Boltayev**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash  
kotibi, fizika-matematika fanlari doktori  
(DSc), professor

**M.Z. Sharipov**

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash  
qoshidagi Ilmiy seminar raisi, fizika-  
matematika fanlari doktori (DSc), professor

## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertasiyasiga avtoreferat)

**Dissertasiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda yangi texnologiyalarni joriy etish va rivojlantirish sohasida raqobat juda yuqori bo'lib, magnitoelastik masalalar yechimiga qaratilgan innovatsiyalar sanoat va texnologik loyihalarning ilg'orligini ta'minlashda yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida magnitelastik deformatsiyalanishini matematik modellashtirish orqali tadqiq qilish va mexanik va elektromagnit maydonlarning birgalikdagi o'zaro ta'sirini baholashning yangi usullarini amaliyotga joriy etishni taqazo etadi. Shu jihatdan yangi innovatsion texnologiyalarni yaratish uchun ushbu murakkab fizik jarayonlarning mexanik, elektromagnit va issiqlik maydonlari bilan o'zaro ta'siri chuqur tadqiq etilishi talab qilinadi va bu esa materiallarning xususiyatlarini samarali boshqarish, ularning magnit maydon ta'siridagi mexanik holatini o'rganish va yangi qurilmalar, texnologik echimlar uchun muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda tok eltuvchi plastinka va qobiqlar shaklidagi konstruktiv mikroelementlarning vaqt bo'yicha o'zgaruvchan elektromagnit maydoni bilan termomagnitelastik o'zaro ta'siri bo'yicha ilmiy tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, ushbu tadqiqotlar konstruktiv elementlarning samaradorligini oshirish, ularning xizmat muddati va ishonchliligini yaxshilash, shuningdek, sanoat va ilmiy texnologik jarayonlarda qo'llaniladigan ilg'or texnologiyalarni ishlab chiqishda ahamiyatini hisobga olganda bu mikroelementlarning issiqlik, magnit va mexanik maydonlar bilan bo'g'liqlik o'zaro ta'sirini tahlil qilish, shuningdek, tok eltuvchi plastinka va qobiqlarning kuchlanganlik va deformatsiyalanganlik holatini noxiziqli faktorlarning, xususan geometrik noxiziqlilikni hisobga olgan holda magnitelastik masalalari sonli echishga alohida e'tibor berilmoqda.

O'zbekiston Respublikasida ham magnitoelastik o'zaro ta'sirlar bo'yicha tadqiqotlar texnologik tizimlarning energetik samaradorligini oshirishga qaratilgan yangi echimlarni yaratishga, energiyani yig'ish va qayta ishlash tizimlarida magnit-mexanik o'zgarishlar o'zaro kuchlarni boshqarish orqali ko'proq energiya samaradorligini ta'minlashga doir keng ko'lamlil ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktyabrdagi "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi Farmonida, jumladan, "...ilmiy-innovatsion salohiyatdan keng foydalanish, istiqbolda ilm-fanni muntazam isloh qilib borishning ustuvor yo'nalishlarini belgilash, zamonaviy bilimga ega mustaqil fikrlaydigan yuqori malakali kadrlar tayyorlash,..."<sup>1</sup> bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, жумладан, turli o'zaro ta'sir kuchlari va jismning fizik xossalari o'rtasidagi bog'lanishlarni tadqiq qilish orqali yangi matematik modellar va fizik qonuniyatlar ishlab chiqish texnologik loyihalarning ilg'orligini ta'minlashda muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "Yangi O'zbekistonning 2022-2026-yillarga mo'ljallangan rivojlanish strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-sonli Farmoni, 2018 yil 12 fevraldagi F-5209-son «O'zbekiston Respublikasida kosmik tadqiqotlar va texnologiyalarni rivojlantirish chora-tadbirlari

---

<sup>1</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktyabrdagi PF-6097-son "Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi Farmoni

to'g'risida»gi farmoyishi, 2021 yil 10 fevraldagi PQ-4986 «Axborot texnologiyalari va kommunikasiyalarini yanada rivojlantirishga investisiyalarni jalb qilish chora-tadbirlari to'g'risida»gi qarori va ushbu sohada qabul qilingan me'yoriy-huquqiy hujjatlarda nazarda tutilgan maqsad va vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishiga mosligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining IV. «Axborotlashtirish va axborot-kommunikasiya texnologiyalarini rivojlantirish» ustuvor yo'nalishi doirasida bajarilgan.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Dunyoda magnitoelastik o'zaro ta'sir modellarini yaratish, tok eltuvchi plastinka va qobiqlarning murakkab deformatsiya va kuchlanish holatlarini tavsiflash uchun aniq matematik modellarini ishlab chiqish masalalari bo'yicha bir qator olimlar: Kuang Z.B, Eringen A.C., Maugin G.A., Abdalla A.N., Hachkevych O., Ootao Y., Rostami R., Ebrahimi F., Hutter K., Dinzart F., Sarkisyan S.O., Sabar H., Moon F.C., Bian Y.H., Zhao T., Zhupanska O.I., Loos I.I., Bagdasaryan G.E., Kaloyerov S.A., Bardzokas D.I., Ambarsumyan S.A., Belubekyan M.V., Kudryavsev B.A., Parton V.Z., Guz A.N., Maxort F.G., Grigorenko Ya.M., Molchenko L.V. lar va boshqa xorijiy olimlar tomonidan tadqiqotlar olib borilgan.

Respublikamizda magnit maydon va mexanik elastik jismning o'zaro ta'sirini matematik modellashtirish, magnitoelastik masalalarni sonli yondashuv yordamida yechish usullari bo'yicha Shirinqulov T.Sh., Nazirov Sh.A., Nuraliyev F.M., Indiaminov R.Sh. kabi olimlar muhim ilmiy tadqiqotlar olib borganlar.

Magnit maydoniga joylashtirilgan elastik jismlarda magnit, elektr va mexanik maydonlar bir-biriga o'zaro ta'sir ko'rsatishi natijasida murakkab jarayonlar yuzaga keladi. O'zaro bog'liqlik maydonlarning noxizizli xususiyatlarini aniqlash va ularni matematik modellarga kiritish katta qiyinchilik tug'diradi. Turli material-larda maydonlarning intensivligi oshib borganda, ularning mexanik xossalari sezilarli darajada o'zgarishi mumkin. Elektr tokini eltuvchi yupqa elastik jismlar-ning magnitomekanik bog'liqligi bo'yicha olib borilgan tahlillar shuni ko'rsata-diki, bu masalalar hali ham to'liq va chuqur o'rganilmaganligicha qolmoqda.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya Muhammad al-Xorazmiy nomidagi TATU Samarqand filialining ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga kirgan BV-F4-014 «Elektromagnit moslashuvlikni hisobga olgan holda elektron qurilmalar, mikro-va nano-tizimlar yupqa elementlari magnit maydonida magnitelastik tebranishlari masalalarini yechishning amaliy usullari va magnitelastiklikning matematik asoslarini rivojlantirish» (2017-2020) fundamental A-5-030 «Anizotrop jismlar magnitotermoelastikligi bog'liqlik masalalari matematik va dasturiy ta'minoti» (2015-2017) amaliy grantlar doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** – vaqtga bo'g'liq o'zgaruvchan mexanik va magnit maydonlarning ta'sirida tok o'tkazuvchi aylanma paraboloid shaklidagi yupqa qobiqning magnitelastik deformatsiyalanish jarayonini matematik modellashtirish, kuchlanganlik va deformatsiyalanish holati nazariyasini takomillashtirish va rivojlantirishdan iborat.

### **Tadqiqotning vazifalari:**

qutblanish va magnitlanish xususiyatlariga ega bo'lmagan paraboloid shaklidagi elektr tokini eltuvchi aylanish sirtli qobiqning magnitelastik deformatsiyalanishini o'zgaruvchan mexanik va elektrodinamik kuchlar ta'sirlarini hisobga olgan holda matematik modellashtirish;

paraboloid shaklidagi elektr tokini eltuvchi yupqa aylanish sirtli qobiq magnitelastikligining ikki o'lchamli modelini qurish;

elektr tokini eltuvchi paraboloid shaklidagi egiluvchan aylanish sirtli qobiqning kuchlanganlik va deformatsiyalanish holatini tadqiq qilish imkon beruvchi magnitelastiklikning bog'langan masalalarini sonli yechish uchun hisoblash algoritmlari va dasturiy vositalarini ishlab chiqish;

aylanma paraboloid shaklidagi yupqa qobiqning kuchlanganlik va deformatsiya holatlarini tadqiq qilish, elektromagnit va mexanik effektlarni o'rganish, sonli tajribalar o'tkazish, hamda olingan sonli natijalarni tahlil qilish.

**Tadqiqot obyekti** sifatida vaqt bo'yicha o'zgaruvchan elektromagnit maydonida elektr tokini eltuvchi paraboloid shaklidagi yupqa aylanish sirtli qobiqning magnitoeplastik deformatsiyalanish jarayoni olingan.

**Tadqiqot predmeti** –paraboloid shaklidagi tok eltuvchi aylanish sirtli qobiqning magnitelastiklik deformatsiyalanishini matematik modellari, hisoblash algoritmlari, dasturiy vositalari, kuchlanganlik va deformatsiyalanish holatlari va elektromagnit effektlar tahlillari tashkil etadi.

**Tadqiqot usullari.** Tadqiqot jarayonida deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi usullari, hamda Nyumark, chiziqilashtirish va diskret ortogonallashtirish usullari qo'llanilgan.

### **Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

vaqtga bog'liq o'zgaradigan elektr, magnit va mexanik maydonlari ta'sirida bo'lgan aylanma paraboloid shaklidagi yupqa qobiqning magnitelastik deformatsiyalanishi matematik modeli ishlab chiqilgan;

magnit maydon ostida joylashgan paraboloid shaklidagi tok eltuvchi aylanish sirtli qobiqning deformatsiyalanish va elektromagnit maydon bilan o'zaro ta'sirini birgalikda tahlil qilish inkonini beruvchi magnitelastiklikning geometrik noxiziqli ikki o'lchamli model ishlab chiqilgan;

ilk bora aylanma paraboloid shaklidagi tok eltuvchi yupqa qobiqning magnitelastikka bog'liqlik masalalarini sonli yechish uslubiyoti va algoritmlari ishlab chiqilgan;

tok eltuvchi yupqa qobiqda tashqi begona tokning va magnit maydonining o'zgarishiga bog'liq ravishda kuchlanganlik-deformatsiya holatida tashqi begona elektr toki qiymatining oshishi natijasida qobiqning kuchlanishi va ko'chishi, Lorens kuchining normal tashkil etuvchisi, magnit induksiyasi, elektr maydoni kuchlanganligi qiymatlari oshishiga olib kelishi aniqlangan.

### **Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

to'k o'tkazuvchi qobiq magnitelastik masalasini echish uchun ishlab chiqilgan usullar yuqori chastotali toklar bilan induktiv qayta ishlash texnologiyalarida magnit maydonning turli metal konstruksiyalarga ta'sirini baholashga va uni optimallashtirishga imkon bergan;

magnit maydoni bilan bog'liq o'zaro ta'sirlar, magnitelastik deformatsiya

jarayonlarini aniq modellashtirish orqali yangi texnologik yechimlar yaratish va mavjud jarayonlarni yanada samarali qilish imkoniyati yaratilgan;

### **Tadqiqot natijalarining ishonchligi.**

Elastik jismlar mexanikasi va magnit maydonlar fizikasi usullarini qoʻllagan holda magnitelastik chegaraviy masalani toʻgʻri qoʻyish, matematik ifodalar qatʼiyligini taʼminlash, asoslangan yechish usullaridan foydalanish va yechimlarning aniqligini baholash, shuningdek, boshqa matematik qoʻyilgan masalalarni yechimlari bilan taqqoslash yordamida asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqotda olingan natijalarning ilmiy ahamiyati yupqa plastinka va qobiqlar magnitelastikligi nazariyasining rivojlanishiga qoʻshgan salmoqli hissasi bilan izohlanadi.

Tadqiqot ishining amaliy ahamiyati magnit maydon taʼsirida boʻlgan paraboloid shaklidagi aylanish sirtli izotrop qobiqning deformatsiya va kuchlanishlarini hisoblash hamda baholash uchun sonli algoritmlar va dasturiy vositalar ishlab chiqilganligi va takomillashtirilgani bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Tadqiqotdagi oʻzgaruvchan elektromagnit mexanik kuchlarning taʼsiri jarayonida tok eltuvchi aylanish sirtli yupqa qobiq shaklidagi mikroelementlarning magnitoelastik kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatlarini tadqiq qilish uchun ishlab chiqilgan matematik modellar, sonli algoritmlar va dasturiy vositalar asosida:

elektrodinamik va elektromagnit moslashuvchanlikni inobatga olgan holda, tok eltuvchi kesik aylanma paraboloid shaklidagi yupqa qobiq konstruktiv mikroelementlariga oʻzgaruvchan elektromagnit mexanik kuchlarining taʼsiri jarayonlarini aniqlash maqsadida Samarqand viloyati «Elektromagnit moslashuv xizmati» tasarrufidagi elektromagnit toʻlqinlarni oʻlchaydigan qurilmalarida ishlatiladigan konstruktiv mikroelementlariga joriy qilingan (Oliy taʼlim, fan va innovatsiyalar vazirligining 13.06.2024 yil №3/17-4/4-10003-son maʼlumotnomasi). Natijada oʻzgaruvchan elektrodinamik kuchlar taʼsiri jarayonida boʻlgan tok eltuvchi kesik aylanma paraboloid shaklidagi yupqa qobiqning elektro-magnit mexanik parametrlari uchun ishlab chiqilgan tavsiyalar asosida yupqa qobiqning mustahkamligi holati 6-11% ga orttirilishiga erishilgan, yaratilgan matematik va dasturiy taʼminot muhandislik hisoblarini oʻtkazishga ketadigan vaqt va mehnat sarfini 6-8% ga qisqartirish imkonini bergan;

tok eltuvchi aylanish sirtli kesik paraboloid shaklidagi mikroelementlarning tebranishlari va ularning elektromagnit maydoni bilan murakkab oʻzaro taʼsir jarayonlarini aniqlash hamda qobiqlarda paydo boʻladigan elektromagnit mexanik effektlarni tahlil etish maqsadida «AlNet» Shuba Korxonasi soha ish jarayonlarida ishlatiladigan elektron qurilmalardagi diod va tranzistorlari tarkibidagi konstruktiv mikroelementlariga joriy qilingan (Oliy taʼlim, fan va innovatsiyalar vazirligining 13.06.2024 yil №3/17-4/4-10003-son maʼlumotnomasi). Natijada ishlab chiqilgan tavsiyalar asosida qurilmalarda ishlatiladigan tok eltuvchi yupqa mikroqobiqlarning mustahkamligi 8-10% ga orttirilishiga erishilgan, elektromagnit mexanik kuchlar taʼsirida boʻlgan yupqa qobiq egilishini minimallashtirishdagi baholash ish unumdorligini 6-8% ga oshirishga imkon bergan;

aylanish sirtli kesik paraboloid shaklidagi tok eltuvchi yupqa mikroelementlarning tebranishlari, ularning elektromagnit maydoni bilan oʻzaro murakkab

nostasionar ta'sir jarayonlari va ularda paydo bo'ladigan elektromagnit mexanik effektlarini tahlil etish maqsadida "O'ZBEKTELEKOM" AK Samarqand filiali Ishtixon tuman telekommunikatsiya bog'lamasiga qarashli elektron avtomatik stansiyalarining elektron boshqaruv mashinalarida ishlatiladigan tok eltuvchi yupqa mikroelementlariga joriy qilingan (Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 13.06.2024 yil №3/17-4/4-10003-son ma'lumotnomasi). Natijada ishlab chiqilgan tavsiyalar asosida aylanish sirtli kesik paraboloid shaklidagi tok eltuvchi qobiqlarning mustahkamligi holati 8-12% ga orttirilishiga, qobiqning egilishini minimallashtirishga erishish maqsadida yaratilgan matematik va dasturiy ta'minot muhandislik hisoblarini o'tkazishga ketadigan vaqt va mehnat sarfini 6-8% ga qisqartirish imkonini bergan;

tok eltuvchi yupqa mikroqobiqlarning tebranishlari va elektromagnit maydoni bilan o'zaro murakkab o'zgaruvchan ta'sir jarayonlari hamda ularda sodir bo'ladigan elektromagnit mexanik effektlarini tahlil qilish maqsadida Jizzax politexnika instituti "Radioelektronika" kafedrasida tasarrufida bo'lgan ilmiy va o'quv laboratoriyasidagi o'lchov-tekshiruv priborlarida ishlatiladigan tok o'tka-zuvchi yupqa konstruktiv mikroelementlariga joriy qilingan (Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 13.06.2024 yil №3/17-4/4-10003-son ma'lumotnomasi). Natijada elektrodinamik kuchlar ta'sirida bo'lgan tok eltuvchi yupqa qobiq shaklidagi mikroelementning elektromagnit mexanik parametrlari uchun ishlab chiqilgan tavsiyalar asosida qobiqning mustahkamligi 5-8% ga orttirilishiga erishilgan, yaratilgan matematik va dasturiy ta'minot muhandislik hisoblarini o'tkazishga ketadigan vaqt va mehnat sarfini 6-7% ga qisqartirish imkonini bergan;

aylanish sirtli qobiqning chiziqli bo'lmagan elastik deformatsiyalanishini o'zgaruvchan mexanik kuchlar ta'sirlarini hisobga olgan holdagi matematik modellari, kuchlanganlik-deformatsion holatini tadqiq qilish imkonini beradigan elastiklikning masalalarini sonli yechish uchun hisoblash algoritmlari va dasturiy vositalari kabi dissertatsiyasi ilmiy natijalaridan Davlat ilmiy-texnika dasturi doirasida 2016-2020 yillarda bajarilgan OT-F4-01 "Qovushqoq suyuqlik oquvchi ko'p qatlamli kompozit quvurlar egri chiziqli bo'laklarining harorat va dinamik yuklanishlar ta'sirida chiziqli bo'lmagan dinamik kuchlanish-deformatsiya holatini o'rganish usullarini ishlab chiqish va nazariyasini rivojlantirish" mavzusidagi fundamental loyihada foydalanilgan (Toshkent kimyo-texnologiya institutining 16.10.2024 yil №1/04-2659-son ma'lumotnomasi). Natijada seysmik va tashqi kuchlar ta'sirida ko'p qatlamli suyuqlik oquvchi yer osti egri chiziqli quvurning kuchlanganlik-deformatsiya holatini hisoblash imkonini yaratilgan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Mazkur tadqiqot natijalari 9 ta ilmiy-amaliy anjumanlarda, shu jumladan 7 ta xalqaro va 2 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 16 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta maqola, shundan 4 tasi respublika, 3 tasi xorijiy jurnallarda nashr qilingan, hamda 2 ta EHM uchun yaratilgan dasturiy vositalarni qayd qilish guvohnomalari olingan.

**Dissertasiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertasiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertasiyaning hajmi 108 betni tashkil etgan.

## DISSERTASIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertasiya mavzusining O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mos ravishda dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqotning obyekti va predmeti ko'rsatilgan, uning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, nazariy va amaliy ahamiyatlari ochib berilgan, tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etish holatlari, shuningdek, tadqiqot natijalarining chop etilganligi hamda dissertasiya tuzilishi haqida ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertasiyaning «**Tok eltuvchi qobiqlarning magnitelastiklik muammolariga bag'ishlangan adabiyotlar tahlili**» deb nomlangan birinchi bobida elastik jismlar va magnit maydonlar o'zaro ta'siri muammolariga bag'ishlangan ilmiy manbalarning batafsil tahlili hamda magnitoelastik jarayonlarning sonli modellashtirish usullari, magnitoelastik masalalarni yechish uchun sonli yondashuvlar, tok o'tkazuvchi plastinka va qobiqlar va elektromagnit maydon o'rtasidagi o'zaro ta'sir modellarini ishlab chiqish va kuchlanganlik-deformatsiya holatini tadqiq qilishga bag'ishlangan tadqiqotlar sharhi berilgan.

Magnitelastiklik yo'nalishidagi so'ngi ilmiy tadqiqotlar turli magnit elastikli yangi materiallardagi elektromagnit va elastik xususiyatlarning murakkab o'zaro ta'sir muammolarini tadqiq qilishga qaratilgan.

Magnit maydon ta'sirida jismning har xil shakli va geometriyasiga ko'ra nozik bog'liqliklarni hisobga oluvchi modellarning ishlab chiqilishi muhim hisoblanishi, hamda o'zaro ta'siri muammolari matematik nuqtai nazardan murakkab ekanligi bunday masalalar uchun aniq matematik yechimlar yoki sonli yechimlar usullarini rivojlantirish muhimligi va yetarli darajada o'rganilmaganligini keltirilgan adabiyotlar tahlilidan kelib chiqadi. Bunga boshlang'ich bog'liqli magnitelastik xususiy hosilali differensial tenglamalar sistemasining murakkabligi, bu kabi noxiziqli masalalarni yechish usullari va algoritmlari mavjud emasligi bilan bog'liq, bu esa dissertasiya ishi maqsadi va masalalarini aniqlash imkonini berdi.

Dissertasiyaning «**Magnitoelastik chegaraviy masalasining qo'yilishi**» deb nomlangan ikkinchi bobida tutash muhit mexanikasi va elektrodinamikasi tenglamalari, magnitelastik balans munosabatlari, elastik muhit harakati tenglamalari va elektromagnit maydoni tenglamalari sistemasi birgalikda tahlil qilingan, holat tenglamalari uchun magnitomexanik miqdorlar shakllantirilgan va tok o'tkazuvchi elastik jism magnit maydon ichida bo'lsa, elektromagnit maydon bilan o'zaro ta'sir orqali jismga ta'sir qiluvchi kuchlar hosil bo'lishi, bu kuchlar elektr tokning magnit maydon bilan o'zaro ta'sirida paydo bo'ladigan Lorents kuchi, jismning qutblanishi, magnitlanishi va elektromagnit energiyaning mexanik energiyaga aylanish jarayonlari natijasida vujudga kelishi, bu ta'sirlar natijasida jismda deformatsiyalar, kuchlanishlar va energetik o'zgarishlar yuz berishi ko'rsatilgan, tok eltuvchi elastik jism magnitoelastikligi tenglamalari sistemasi hosil qilingan va mos magnitelastik noxiziqli chegaraviy masala shakllantirilgan.

Mazkur ishda magnit maydonga joylashtirilgan tok o'tkazuvchi jismda magnit maydon va elektr tokning o'zaro ta'siri natijasida paydo bo'ladigan elektrodinamik kuchlarni hisobga olgan holda tok eltuvchi jismning magnitoelastik deformatsiyalanishi matematik modeli taklif etildi:

$$\frac{\partial t_{ki}}{\partial x_k} + \rho(F_i + F_i^\wedge) = \rho \frac{dV_i}{dt}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ijk} \frac{\partial H_k}{\partial x_j} = J_i + \frac{\partial D_i}{\partial t}, \quad \frac{\partial B_i}{\partial x_i} = 0, \quad \varepsilon_{ijk} \frac{\partial E_k}{\partial x_j} = -\frac{\partial B_i}{\partial t}, \quad \frac{\partial D_i}{\partial x_i} = \rho_e. \quad (2)$$

$$J_i = \sigma \left( E_i + \varepsilon_{ijk} \frac{\partial u_j}{\partial t} B_k \right) + \rho_e \frac{\partial u_i}{\partial t}, \quad (3)$$

$$D_i = \varepsilon E_i, \quad B_i = \mu H_i, \quad (4)$$

$$\rho F_i^\wedge = \varepsilon_{ilm} J_l B_m + \rho_e E_i, \quad (5)$$

mos ravishda boshlang'ich va chegaraviy shartlar

$$v_k (t_{ki} + \tau_{ki}) / s_1 = \left[ P_i + v_k \tau_{ki}^{(c)} \right] / s_1, \quad (6)$$

bu yerda

$$\tau_{ki} = E_i D_k + H_i B_k - 1/2 \delta_{ki} (E_j D_j + H_j B_j),$$

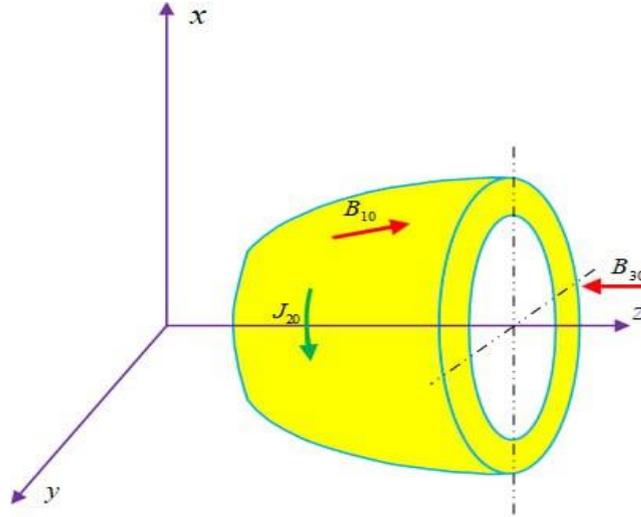
$$\vec{u} = 0, \quad \vec{\dot{u}} = 0, \quad \vec{B} = 0, \quad \vec{B}^{(c)} = 0, \quad \vec{H} = 0, \quad \vec{H}^{(c)} = 0. \quad (7)$$

(1) - (7) munosabatlarda quyidagi belgilashlar kiritilgan: ichki kuchla-nishlar tenzori komponentalari  $t_{ij}$ ; hajmiy mexanik kuch vektori komponentalari  $\rho F_i$ ; Lorens hajmiy kuchi vektori komponentalari  $\rho F_i^\wedge$ ;  $\varepsilon_{ijk}$  –tenzor Levi-Chivita tenzori; mos holda elektr maydoni kuchlanishi va induksiyasi, hamda magnit maydoni kuchlanishi va induksiyasi vektorlari komponentalari  $E_k, D_k, H_k, B_k, J_k$ ; to'la tok zichligi vektori komponentalari  $J_k = J_k^* + \rho_e V_k$ ; o'tkazish toki zichligi  $J_k^*$ ; konvektiv tok zichligi  $\rho_e V_k$ ; zaryadlar hajmiy zichligi  $\rho_e$ ; aktual holatdagi modda zichligi  $\rho$ ;  $\varepsilon$  – elektr sindiruvchanlik koeffitsiyenti,  $\mu$  – magnit sindiruvchanlik koeffitsiyenti;  $\tau_{ki}, \tau_{ki}^{(c)}$  – jism va vakumdagi Maksvell tenzorlari;  $P_i$  – deformatsiya-lanmagan holatda yuza o'lchamlariga to'g'ri keladigan sirt kuchi tashkil etuvchisi;  $v_k$  – jism deformatsiyalangan chegarasidagi normalning birlik vektori komponentalari;  $s_1$  – chegaraviy shartlar kuchlanishlarda berilgan jism chegarasi qismi; tezlik vektori komponentalari  $V_k$ ; vaqt bo'yicha to'la hosila  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V_k \frac{\partial}{\partial x_k}$ ,  $\vec{u}$  - ko'chish vektori, (c) - indeks miqdorlarning tashqi muhitga tegishli ekanligini ko'rsatadi.

Shunday qilib, (1), (2) munosabatlar va (3)–(5), hamda (6), (7) bilan birgalikda, magnit maydonga joylashtirilgan tok o'tkazuvchi jismda magnit maydon va elektr tokning o'zaro ta'siri natijasida paydo bo'ladigan elektrodinamik kuchlarni hisobga olgan holda tok eltuvchi jismning magnitoelastik deformatsiyalanishi matematik modelini tashkil etadi.

Dissertasiyaning «**Paraboloid shaklidagi aylanish sirtli yupqa qobiqning magnitelastik deformatsiyalanishi modeli**» deb nomlangan uchinchi bobida vaqt bo'yicha o'zgaruvchan mexanik va elektrodinamik kuchlar ta'sirida bo'lgan qutblanmaydigan va magnitlanmaydigan tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli qobiqning magnitoelastik deformatsiyalanishi matematik modellash-tirilgan, shunindek, geometrik nochiziqlikni hisobga olgan holda aylanish sirtli yupqa qobiqning kuchlanganlik-deformatsiya holatini tadqiq qilish imkononi beradigan magnitelastiklikning ikki o'lchamli modeli ishlab chiqilgan hamda,

paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli qobiqning hal qiluvchi yechiladigan bog‘langan tenglamalar sistemasini hosil qilingan va noxiziqli magnitoelelastik chegaraviy masala shakllantirilgan. Vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan mexanik va elektrodinamik kuchlar ta‘sirida bo‘lgan qutblanmaydigan va magnitlanmaydigan tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli qobiqning deformatsiyalanishi masalasini qaraymiz (1-rasm). Paraboloid shaklidagi qobiq materiali umumlashgan Guk qonuniga bo‘ysunadi deb hisoblaymiz. Bu magnitelastik material muhit harakatini ifodalaydigan tenglamalar sistemasini shakllantiramiz.



**1-rasm. Elektromagnit va mexanik yuklanishlar tasirida bo‘lgan tok o‘tkazuvchi paraboloid shaklidagi aylanish sirtli qobiq**

Kirxgof-Lyav va unga mos bo‘lgan elektromagnit gipotezalaridan foydalangan holda, vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan mexanik va elektrodinamik kuchlar ta‘sirida bo‘lgan qutblanmaydigan va magnitlanmaydigan tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli yupqa qobiqning magnitelastik bog‘langan tenglamalari ikki o‘lchamli taqribiy sistemi geometrik noxiziqliklarni hisobga olgan holda hosil qilingan:

magnitoelelastiklik tenglamalari:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial s}(rN_s) - \cos \varphi N_\theta + \frac{\partial S}{\partial \theta} + \frac{1}{R_s} \frac{\partial H}{\partial \theta} + \frac{r}{R_s} Q_s + r(P_s + \rho F_s^\wedge) &= r\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\
 \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial S}(r^2 S) + \frac{\partial}{\partial s}(\sin \varphi H) + \frac{\cos \varphi}{R_s} H + \\
 + \sin \varphi Q_\theta + r(P_\theta + \rho F_\theta^\wedge) &= r\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\
 \frac{\partial}{\partial s}(rQ_s) + \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} - \frac{r}{R_s} N_s - \sin \varphi N_\theta + r(P_\gamma + \rho F_\gamma^\wedge) &= r\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \quad (8) \\
 \frac{\partial H}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial s}(rM_s) - \cos \varphi M_\theta - rQ_s - r\left(N_s - \frac{\sin \varphi}{r} M_\theta\right) \vartheta_s - rS\vartheta_\theta &= 0; \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial S}(r^2 H) + \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} - rQ_\theta - r\left(N_\theta - \frac{1}{R_s} M_s\right) \vartheta_\theta - rS\vartheta_s &= 0; \\
 -\frac{\partial B_\gamma}{\partial t} &= \frac{1}{r} \left( \frac{\partial(rE_\theta)}{\partial s} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_s}{\partial \theta} \right);
 \end{aligned}$$

$$\sigma \left[ E_s - \frac{\partial v}{\partial t} B_\gamma - 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\theta^+ + B_\theta^-) \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial H_\gamma}{\partial \theta} + \frac{H_\theta^+ - H_\theta^-}{h};$$

$$\sigma \left[ E_\theta - \frac{\partial u}{\partial t} B_\gamma + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\theta^+ + B_\theta^-) \right] = -\frac{\partial H_\gamma}{\partial s} + \frac{H_\theta^+ - H_\theta^-}{h};$$

deformasiyaning ko'chish orqali ifodasi:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ss} &= \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{w}{R_s} + \frac{1}{2} \vartheta_s^2; \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\cos \varphi}{r} u + \frac{\sin \varphi}{r} w + \frac{1}{2} \vartheta_\theta^2; \\ \varepsilon_{s\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{v}{r} \right) + \vartheta_s \vartheta_\theta; \\ \chi_{ss} &= \frac{\partial v_s}{\partial s}, \quad \chi_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial \theta} + \frac{\cos \varphi}{r} \vartheta_s; \\ \chi_{s\theta} &= \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_s}{\partial \theta} - \frac{\cos \varphi}{r} \vartheta_\theta + \frac{1}{R_s} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{\cos \varphi}{r} v \right) + \frac{\sin \varphi}{r} \frac{\partial v}{\partial s}, \end{aligned} \quad (9)$$

bu yerda

$$\begin{aligned} \vartheta_s &= -\frac{\partial w}{\partial s} + \frac{u}{R_s}; \\ \vartheta_\theta &= -\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\sin \varphi}{r} v \end{aligned}$$

normalning burilish burchaklari;

elastiklik munosabatlari:

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{Eh}{1 - \nu^2} [\varepsilon_{ss} + \nu \varepsilon_{\theta\theta}]; \\ N_\theta &= \frac{Eh}{1 - \nu^2} [\varepsilon_{\theta\theta} + \nu \varepsilon_{ss}]; \\ S &= \frac{Eh}{2(1 + \nu)} \varepsilon_{s\theta}; \\ H &= \frac{Eh^3}{12(1 + \nu)} \chi_{s\theta}; \\ M_s &= \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} [\chi_{ss} + \nu \chi_{\theta\theta}]; \\ M_\theta &= \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} [\chi_{\theta\theta} + \nu \chi_{ss}]; \end{aligned} \quad (10)$$

Lorens kuchi tashkil etuvchilari quyidagi ko'rinishga ega:

$$\begin{aligned} \rho F_s^\wedge &= h J_{\theta st} B_\gamma + \sigma h E_\theta B_\gamma + \sigma h \left\{ 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_s^+ + B_s^-) B_\gamma - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial u}{\partial t} B_\gamma^2 - \frac{\partial u}{\partial t} \left[ 0,25 (B_\theta^+ + B_\theta^-)^2 + \frac{1}{12} (B_\theta^+ + B_\theta^-)^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial v}{\partial t} \left[ 0,25 (B_s^+ + B_s^-) (B_\theta^+ + B_\theta^-) + \frac{1}{12} (B_s^+ - B_s^-) (B_\theta^+ - B_\theta^-) \right] \right\}; \\ \rho F_\theta^\wedge &= -h J_{sst} B_\gamma - \frac{h}{r\mu} \frac{\partial B_\gamma}{\partial \theta} B_\gamma + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +\sigma_2 h \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} \left[ 0,25(B_s^+ + B_s^-)(B_\theta^+ + B_\theta^-) + \frac{1}{12}(B_s^+ - B_s^-)(B_\theta^+ - B_\theta^-) \right] - \right. \\
& \left. - \frac{\partial v}{\partial t} \left[ 0,25(B_\theta^+ + B_\theta^-)^2 + \frac{1}{12}(B_\theta^+ - B_\theta^-)^2 \right] - \frac{B_\theta^+ - B_\theta^-}{\mu} B_\gamma \right\}; \quad (11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\rho F_\gamma^\wedge = & 0,5h[J_{sst}(B_\theta^+ + B_\theta^-) - J_{\theta st}(B_s^+ + B_s^-)] + \frac{h}{2r\mu} \frac{\partial B_\gamma}{\partial \theta} (B_\theta^+ + B_\theta^-) - \\
& - 0,5\sigma h E_\theta (B_s^+ + B_s^-) + \sigma h \left\{ 0,5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_s^+ + B_s^-) B_\gamma - \frac{\partial w}{\partial t} \left[ 0,25(B_s^+ + B_s^-)^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{12}(B_\theta^+ - B_\theta^-)^2 + \frac{1}{12}(B_s^+ - B_s^-)^2 \right] \right\} + \frac{(B_\theta^+)^2 - (B_\theta^-)^2}{\mu}.
\end{aligned}$$

Bu yerda:  $N_s, N_\theta$  – normal va tangensial kuchlar;  $S$  – siljitivchi kuch;  $M_s, M_\theta$  – eguvchi momentlar;  $H$  – burovchi moment;  $Q_s, Q_\theta$  – ko‘ndalang kuchlar;  $u, v, w$  – ko‘chish vektori komponentalari;  $\varepsilon_{ss}, \varepsilon_{\theta\theta}, \varepsilon_{s\theta}, \chi_{ss}, \chi_{\theta\theta}, \chi_{s\theta}$  – deformatsiya tenzori komponentalari;  $P_s, P_\theta, P_\gamma$  – mexanik kuch tashkil etuvchilari;  $E$  – Yung moduli;  $\nu$  – Puasson koeffitsiyenti;  $\mu$  – magnit singdiruvchanlik.

Hosil qilingan (8)-(11) tenglamalar sistemasi, vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan mexanik va elektrodinamik kuchlar ta’sirida bo‘lgan qutblanmaydigan va magnitlanmaydigan tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli yupqa qobiqning magnitelastikligi noxiziqli differensial tenglamalari to‘liq yopiq bog‘liqli sistemasini tashkil etadi.

Keltirilgan tenglamalarga boshlang‘ich va chegaraviy shartlarni qo‘shib, magnitelastik chegaraviy masalasi shakllantirilgan.

Dissertasiyaning «**Paraboloid shaklidagi aylanish sirtli yupqa qobiqning magnitelastikligi bog‘liqli masalalarini sonli yechish**» deb nomlangan to‘rtinchi bobi vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan mexanik va elektrodinamik kuchlar ta’sirida bo‘lgan qutblanmaydigan va magnitlanmaydigan tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli yupqa qobiqning noxiziqli magnitelastikligi chegaraviy masalasini yechishda sonli usullarni ketma-ket qo‘llashga, yupqa qobiq magnitelastikligi bog‘liqli masalalarini sonli yechish uchun hisoblash algoritmlarini ishlab chiqishga, kuchlanganlik-deformatsiya holati va elektromagnit effektlarni tadqiq qilishga bag‘ishlangan. Tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli yupqa qobiq noxiziqli magnitelastikligi chegaraviy masalasini sonli yechish chekli ayirmali Nyumark sxemasi, chiziqilashtirish va diskret ortogonallashtirish usullarini ketma-ket qo‘llashga asoslanadi va bu usullarni qo‘llash to‘rtta bosqichni tashkil etadi. Birinchi bosqichda tenglamalar to‘liq sistemasi (8)-(11) dan foydalanib, tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli yupqa qobiqning magnitelastiklik noxiziqli differensial tenglamalari yechiladigan bog‘liqli sistemasi keltirib chiqarigan. Bog‘liqli sistemani hosil qilishda elektromagnit maydoni va ko‘chishlar maydonining hamma komponentalari  $\theta$  koordinatadan bog‘liq emas deb olingan

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0; v = 0; S = 0; H = 0; E_s = 0; B_\theta = 0; P_\theta = 0; \rho F_\theta^\wedge = 0.$$

Tok eltuvchi paraboloid shaklidagi aylanish sirtli qobiq ham ko‘ndalang kesimi ixtiyoriy bo‘lgan egiluvchan qobiqning sinfiga tegishli ekanligini ta’kidlab o‘tamiz va noma’lum funksiyalar sifatida, quyidagilarni olamiz:

$$u_x, u_z, \vartheta_s, N_x, N_z, M_s, E_\theta, B_z, \quad (12)$$

bu yerda  $u_x, u_z$  – radial va o‘q bo‘ylab ko‘chishlar,  $\vartheta_s$  – normalning buralish burchagi,  $N_x, N_z$  – radial va o‘q bo‘ylab zo‘riqish kuchlari,  $M_s$  – eguvchi moment,  $E_\theta$  – elektr maydon kuchlanganligi,  $B_z$  – magnit maydon induksiyasi. Bu kattaliklar  $u, w$  ko‘chishlar va  $N_s, Q_s$  kuchlar bilan quyidagicha bog‘langan:

$$\begin{aligned} N_x &= N_s \cos \varphi + Q_s \sin \varphi, & u_x &= u \cos \varphi + w \sin \varphi, \\ N_z &= N_s \sin \varphi - Q_s \cos \varphi, & u_z &= u \sin \varphi - w \cos \varphi. \end{aligned} \quad (13)$$

Bu funksiyalar ixtiyoriy kesimli aylanma qobiqlarning sodda qo‘shma sharti bajarilganda masala yechish algoritmini tuzishga imkon beradi. Bu holda elastiklik munosabatlari quyidagicha yoziladi:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ss} &= \frac{1 - \nu^2}{Eh} (N_x \cos \varphi + N_z \sin \varphi) - \frac{\nu}{r} u_x, & \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{u_x}{r}, \\ \chi_{ss} &= \frac{12(1 - \nu^2)}{Eh^3} M_s - \frac{\nu \cos \varphi}{r} \vartheta_s, & \chi_{\theta\theta} &= \frac{\cos \varphi}{r} \vartheta_s, \\ N_\theta &= \nu(N_x \cos \varphi + N_z \sin \varphi) + \frac{Eh}{r} u_x, \\ M_\theta &= \nu M_s + \frac{Eh^3 \cos \varphi}{12 r} \vartheta_s. \end{aligned} \quad (14)$$

Bunda  $u_x, u_z$  – ko‘chish komponentalari,  $\vartheta_s$  – normal buralish burchagi,  $N_x, N_z$  – zo‘riqish komponentalari,  $M_s$  – eguvchi moment,  $E_\theta$  – elektr maydon kuchlanganligi,  $B_z$  – magnit maydon induksiyasi.

(13), (14) larni hisobga olib tok eltuvchi egiluvchan izotrop paraboloid shaklidagi aylanish sirtli ko‘ndalang kesimi ixtiyoriy bo‘lgan qobiq magnitoelastik differensial tenglamalari hal qiluvchi sistemasi hosil qilamiz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial s} &= \frac{1 - \nu^2}{Eh} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \cos \varphi + \frac{\nu \cos \varphi}{r} u_x + \frac{1}{R_s} u_z - \\ &\quad - \sin \varphi \vartheta_s - \frac{\cos \varphi}{2} \vartheta_s^2 \\ \frac{\partial u_z}{\partial s} &= \frac{1 - \nu^2}{Eh} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \sin \varphi + \frac{\nu \sin \varphi}{r} u_x - \frac{1}{R_s} u_x + \\ &\quad + \cos \varphi \vartheta_s - \frac{\sin \varphi}{2} \vartheta_s^2 \\ \frac{\partial \vartheta_s}{\partial s} &= \frac{12(1 - \nu^2)}{Eh^3} M_s - \frac{\nu \cos \varphi}{r} \vartheta_s, \\ \frac{\partial N_x}{\partial s} &= \frac{\cos \varphi}{r} (\nu - 1) N_x + \left( \frac{1}{R_s} + \frac{\nu \sin \varphi}{r} \right) N_z + \frac{Eh}{r^2} u_x - (P_r + \rho F_r^\wedge) + \\ &\quad + \rho h \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \cos \varphi + \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \sin \varphi \right), \\ \frac{\partial N_z}{\partial s} &= -\frac{\cos \varphi}{r} N_z - \frac{1}{R_s} N_x - (P_z + \rho F_z^\wedge) + \rho h \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \sin \varphi - \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \cos \varphi \right), \\ \frac{\partial M_s}{\partial s} &= \frac{\cos \varphi}{r} (\nu - 1) M_s + \frac{Eh^3 \cos^2 \varphi}{12 r^2} \vartheta_s + \cos \varphi N_x - \sin \varphi N_z + \\ &\quad + (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \vartheta_s - \frac{\nu \sin \varphi}{r} M_s \vartheta_s - \frac{Eh^3 \cos \varphi \sin \varphi}{12 r} \vartheta_s^2, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{\partial E_\theta}{\partial s} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{\cos \varphi}{r} E_\theta,$$

$$\frac{\partial B_\gamma}{\partial s} = -\sigma\mu \left[ E_\theta + 0,5 \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) (B_s^+ + B_s^-) - \mu J_{\theta ct} - \right. \\ \left. - \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_z \right] + \frac{B_s^+ - B_s^-}{h}$$

Lorens kuchi komponentalari:

$$\rho F_r^\wedge = h J_{\theta ct} B_\gamma + \sigma h \left[ E_\theta B_\gamma + 0,5 \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) (B_s^+ + B_s^-) B_\gamma - \right. \\ \left. - \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_z^2 \right]$$

$$\rho F_z^\wedge = -0,5 h J_{\theta ct} (B_s^+ + B_s^-) - \sigma h \{ 0,5 E_\theta (B_s^+ + B_s^-) + \\ + \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) \left[ 0,25 (B_s^+ + B_s^-)^2 + \frac{1}{12} (B_s^+ - B_s^-)^2 \right] - \\ - 0,5 \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_z (B_s^+ + B_s^-) \}. \quad (16)$$

Bunda

$$P_r = P_s \cos \varphi + P_\gamma \sin \varphi, \quad P_z = P_s \sin \varphi - P_\gamma \cos \varphi,$$

$$F_r^\wedge = F_s^\wedge \cos \varphi + F_\gamma^\wedge \sin \varphi, \quad F_z^\wedge = F_s^\wedge \sin \varphi - F_\gamma^\wedge \cos \varphi.$$

Vaqt bo'yicha o'zgaruvchan mexanik va elektrodinamik kuchlar ta'sirida bo'lgan qutblanmaydigan va magnitlanmaydigan tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli yupqa qobiqning magnitelastik chegaraviy masalalarini sonli yechish murakkab jarayon bo'lib, matematik hisoblash qiyinchiliklari bilan bog'liq bo'ladi. Bu esa, tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli yupqa qobiqning magnitelastik (15) yechiladigan sistema, sakkizinchi tartibli giperbola-parabolik turdagi o'zgaruvchan ko'effitsiyentli differensial tenglamalar sistemasi ekanligi bilan izohlanadi. Hosil qilingan yechiladigan hal qiluvchi sistemaga boshlang'ich va chegaraviy shartlarni qo'shib chegaraviy masalani hosil qilamiz.

Chiziqlimas chegaraviy masalani vektor shaklda quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

yechiladigan (15) sistema vektor shaklda

$$\frac{\partial \vec{N}}{\partial s} = \vec{F} \left( s, t, \vec{N}, \frac{\partial \vec{N}}{\partial t}, \frac{\partial^2 \vec{N}}{\partial t^2} \right), \quad (17)$$

chegaraviy shartlar

$$g_1 \vec{N}(s_0, t) = \vec{b}_1; \quad g_2 \vec{N}(s_N, t) = \vec{b}_2,$$

va boshlang'ich shartlar

$$t = 0 \quad \text{bo'lganda} \quad \vec{N} = 0; \quad \frac{\partial \vec{N}}{\partial t} = 0.$$

Bu yerda:  $\vec{N} = \{u, w, v_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\gamma\}^T$ ;  $\vec{F}$  – umumiy holda chiziqlimas vektor funksiya;  $g_1, g_2$  – to'g'ri burchakli matrisalar;  $\vec{b}_1, \vec{b}_2$  – vektor funksiya. Ikkinchi bosqichda nochiziqli magnitoelastik chegaraviy masalaga chekli ayirmali Nyumark sxemasi qo'llaniladi va mos vaqt qatlamlarida oddiy differensial tenglamalar sistemasi uchun nochiziqli magnitoelastik chegaraviy masalani hosil qilinadi. Vaqt koordinatasi bo'yicha xususiy hosilalar Nyumarkning oshkormas

sxemasi chekli ayirmali ifodalari bilan approksimasiyalanadi:

$$\ddot{u}^{t+\Delta t} = \frac{u^{t+\Delta t} - u^t}{0,25(\Delta t)^2} - \frac{1}{0,25} \left( \frac{\dot{u}^t}{\Delta t} + 0,25\ddot{u}^t \right);$$

$$\dot{u}^{t+\Delta t} = \dot{u}^t + 0,5\Delta t(\ddot{u}^t + \ddot{u}^{t+\Delta t}). \quad (18)$$

(18) Nyumark sxemasi qo'llanilgandan keyin yechiladigan (17) magnitelastik differensial tenglamalar sistemasini mos vaqt orliqlari uchun vektor shaklda quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\frac{\partial \vec{N}}{\partial s} = \vec{F}_1(s, \vec{N}), \quad (19)$$

bu yerda  $\vec{F}_1$  sakkizinchi tartibli vektor. Chegaraviy shartlar:

$$D_1 \vec{N} /_{s=s_0} = \vec{d}_1; \quad D_2 \vec{N} /_{s=s_N} = \vec{d}_2 \quad (20)$$

bu yerda  $D_1, D_2$  -lar  $(8 - k) \times 8, (k < 8)$  tartibli mos to'g'ri burchakli matrisalar;  $\vec{d}_1, \vec{d}_2$  - berilgan vektorlar;  $k$  - konturdagi chegaraviy shartlar.

Uchinchi bosqichda nohiziqli chegaraviy masalaga chiziqilashtirish usuli qo'llaniladi.

Chiziqilashtirish usuli yordamida (19), (20) nohiziqli chegaraviy masala chiziqli chegaraviy masalalar ketma-ketligiga keltiriladi:

$$\frac{\partial \vec{N}^{k+1}}{\partial s} = \vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k); \quad (21)$$

$$B_1(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_0) = \vec{b}_1(\vec{N}^k);$$

$$B_2(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_N) = \vec{b}_2(\vec{N}^k), (k = 0, 1, 2 \dots) \quad (22)$$

bunda  $\vec{N} = \{u, w, v_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\gamma\}^T$ ;  $\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k$  - lar mos holda  $(k + 1)$  - chi va  $k$  - chi iterasiyalardagi yechimlar;  $\vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k)$  - tenglamalar sistemasi o'ng tomoni vektori;  $B_1(\vec{N}^k), B_2(\vec{N}^k), \vec{b}_1(\vec{N}^k), \vec{b}_2(\vec{N}^k)$  - mos holda chegaraviy shartlar o'ng qismi matrisalari. Taklif etilayotgan sxema kvadratik yaqinlashishga egaligi tufayli hisoblash nuqtai nazaridan juda qulay hisoblanadi. Vaqt bo'yicha birinchi qadamda boshlang'ich yaqinlashish sifatida iterasion jarayonda chiziqli chegaraviy masalaning yechimi tanlanadi. Keyingi vaqt bo'yicha qadamlarda esa boshlang'ich yechim sifatida oldingi qadamda olingan yechim tanlanadi. Bunday sxemani tanlash masala yechimi uchun iterasiyalar sonini sezilarli yetarli darajada kamaytish imkonini beradi. Yakuniy to'rtinchi bosqichda (21), (22) chiziqli chegaraviy masalalarning har biri diskret ortogonallashtirish usuli bilan yechildi. Bu usul alohida olingan integrallash nuqtalarida Koshi masalasi vektor yechimlarini ortogonallashtirishda turg'un hisoblash jaryonini ta'minlaydi.

Vaqt bo'yicha o'zgaruvchan mexanik va elektrodinamik kuchlar ta'sirida bo'lgan qutblanmaydigan va magnitlanmaydigan tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop aylanish sirtli yupqa qobiqning magnitelastik bog'liqlik masalalarini sonli yechish algoritmi va dasturiy majmuasini ishlab chiqilgan. Dasturiy majmua "Compaq Visual Fortran" dasturlash muhiti "Visual Fortan" dasturlash tilida yaratilgan. Masalaning matematik qo'yilishi boshqacha bo'lganda yechimlarni taqqoslashlar yordamida olingan natijalarning ishonchliligi tahlili o'tkazilgan. Vaqt bo'yicha o'zgaruvchan mexanik va elektrodinamik kuchlar ta'sirida bo'lgan qutblanmaydigan va magnitlanmaydigan tok eltuvchi paraboloid shaklidagi izotrop

aylanish sirtli yupqa qobiqning deformatsiyalanishi masalasi qaralgan. Aylanish sirtli paraboloid shaklidagi yupqa qobiqning oʻrta sirti meridianining tenglamalarini parametrik shaklda quyidagicha yozamiz:

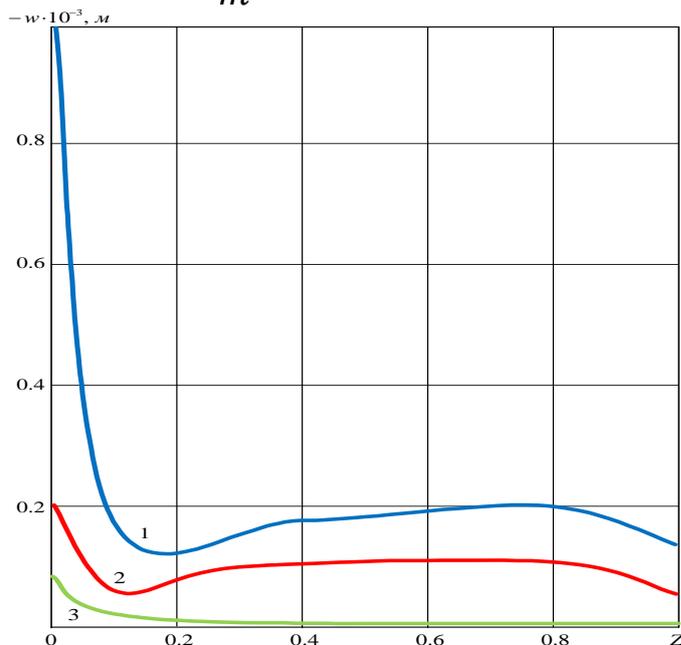
$$r = a\sqrt{z}; \quad z = z \quad (0,1 \leq z \leq 0,5)$$

bunda  $a$  - qobiq parametri. Bogʻliqsiz integrallash oʻzgaruvchisi sifatida  $z$  koordinatani tanlaymiz. U holda qobiqning geometrik xususiyatlari uchun quyidagi munosabatlarga ega boʻlamiz:

$$\cos\varphi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4z}}; \quad \sin\varphi = \frac{2\sqrt{z}}{\sqrt{a^2 + 4z}}; \quad \frac{1}{R_s} = \frac{2a}{(a^2 + 4z)^{3/2}}$$

Masala chegaraviy shartlarda yechilgan:  $s = s_0$  kichik radius konturi  $N_z$  zoʻriqish bilan yuklangan va normal yoʻnalishda erkin va vaqt boʻyicha oʻzgaruvchan  $B_z = 0.3 \sin \omega t$  magnit induksiyasi beriladi, bunda  $\omega$  – doiraviy chastota, magnit induksiyasi  $B_z = 0$  boʻlganda, ikkinchi  $s = s_N$  kontur qattiq mahkamlangan. 2-rasmda  $t = 6 \cdot 10^{-3}$  sek vaqt momentida  $a$  parametrغا bogʻliq ravishda meridian boʻyicha qobiq egilishining oʻzgarishi keltirilgan. 1,2,3 variantlar  $a$  parametrning quyidagi qiymatlariga mos keladi:  $a = 15, a = 2, a = 1$ . 1. Birinchi variant:  $a = 15$ ; 2. Ikkinchi variant:  $a = 2$ ; 3. Uchinchi variant:  $a = 1$ .  $a$  parametrning qiymatlari ortishi bilan qobiq egilishi qiymatlari ham ortadi. Bu holda qobiqqa taʼsir qiluvchi begona elektr toki zichligi, tashqi magnit maydoni va mexanik kuchlarning quyidagi qiymatlari olingan:

$$J_\theta = -5 \cdot 10^{-4} \sin \omega t \text{ A/m}^2, \quad B_{s0} = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ T}, \quad P_0 = 100 \text{ N/m}^2.$$

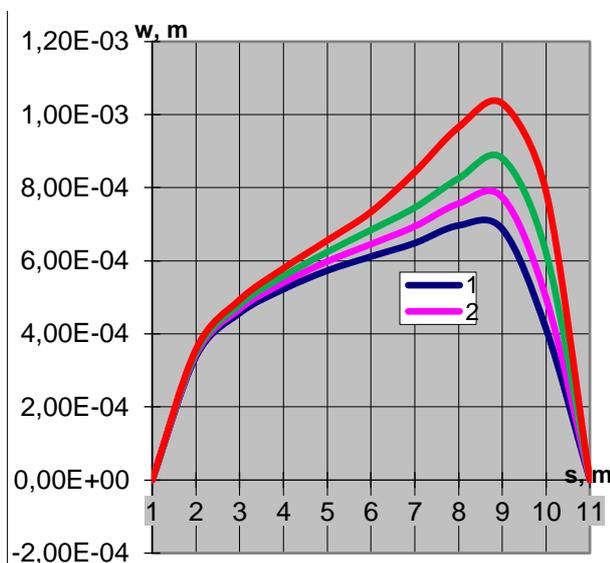


**2-rasm.  $t = 6 \cdot 10^{-3}$  sek vaqt momentida  $a$  parametrغا bogʻliq ravishda meridian boʻyicha aylanish sirtli paraboloid shaklidagi yupqa qobiq egilishining oʻzgarishi grafiklari.**

Aylanish sirtli paraboloid shaklidagi yupqa qobiqda tashqi begona elektr tokining taʼsiri mavjud boʻlganda va boʻlmaganda solishtirib taqqoslanganda magnit induksiya komponentining taʼsir yoʻnalishini oʻzgartiradi. Tashqi magnit maydon taʼsir yoʻnalishining oʻzgartirishi  $B_z$  magnit induksiya holatini tavsifini

o'zgartirmaydi, ammo lekin uning ekstremial qiymatini sezilarli darajada oshiradi.

Magnit maydonida beriliydan yasalgan tok o'tkazuvchi konussimon aylanish sirtli izotrop qobiqning elektr-magnit-mexanik yuklanishlar ta'sirida magnitelastik deformatsiyalanishi masalasini ham qaraymiz. Konussimon aylanish sirtli qobiq konturlarining mahkamlanish shartlari quyidagicha tanlangan:  $s = s_0$  kichik radiusli kontur sharnirli mahkamlangan va vaqt bo'yicha o'zgaruvchan  $B_z = 0,3 \sin \omega t$  magnit induksiyasi beriladi, ikkinchi  $s = s_N$  kontur esa, magnit induksiyasi  $B_z = 0$  nulga teng bo'lganda meridional yo'nalishda erkin. Konussimon aylanish sirtli izotrop qobiqning kuchlanish-deformatsiyon holatiga qalinlikning o'zgarish ta'siri tadqiq qilamiz. Konus meridional yo'nalishda qalinlik  $h = 3 \cdot 10^{-4} (1 - \alpha^S / s_N)$  kabi o'zgaradi. O'zgaruvchan qalinlikli izotrop beriliydan yasalgan konus uchun masala meridional yo'nalishda qalinlikning o'zgarishini tavsiflaydigan  $\alpha = \{0,2; 0,3; 0,4; 0,5\}$  parametrning har xil qiymatlarida hisoblaymiz. Muammoning yechimi  $\tau = 10^{-2} \text{sek}$  vaqt oralig'ida topildi, vaqt bo'yicha integrallash qadami  $\Delta t = 1 \cdot 10^{-3} \text{sek}$  deb olindi. 3-rasmda  $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{sek}$  vaqt momentida  $\alpha$  parametrning turli qiymatlari uchun qobiqning meridiani bo'ylab  $w$  egilishning o'zgarishi ko'rsatilgan. Rasmdagi (1,2,3,4) grafiklar, parametr  $\alpha = \{0,2; 0,3; 0,4; 0,5\}$  ning qiymatlariga mos keladi.



3-rasm.  $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{sek}$  vaqt momentida  $\alpha$  parametrning turli qiymatlari uchun qobiqning meridiani bo'ylab  $w$  egilishning o'zgarishi

Qobiq meridiani bo'ylab egilishlarning maksimal qiymatlari taxminan  $s = 0.04 \text{ m}$  qiymatga yaqin joyda sodir bo'lishi aniqlandi. Bu chegara shartlarga ko'ra, chap uchi sharnirli, qobiqning o'ng uchi esa meridional yo'nalishda erkin bo'lishi bilan izohlanadi. Bundan tashqari, qobiq qalinligi, chap uchidan o'ng uchigacha,  $\alpha = 0.5$  bo'lganda ikki martagacha kamayadi. Shuning uchun, egilishlarning maksimal qiymatlari qobiqning o'ng uchida sodir bo'ladi.

## UMUMIY XULOSALAR

«Magnit maydonida aylanma paraboloid shaklidagi qobiqning magnitoelastik deformatsiyalanishi» mavzusidagi dissertasiya ishidan olingan natijalar asosida

quyidagi xulosalarga kelindi:

1. Elektromagnitodinamik kuchlar ta'sirida bo'lgan tok eltuvchi ferromagnit bo'lmagan aylanma paraboloid shakldagi yupqa qobiqning magnitoelastik nohiziqli deformatsiyalanishi matematik modellashtirildi.

2. Geometrik nohiziqlikni hisobga olgan holda, elektr-magnit-mexanik kuchlar ta'sirida bo'lgan tok eltuvchi egiluvchan izotrop paraboloid shaklidagi aylanish sirtli qobiq kuchlanganlik – deformatsiyaon holatini tadqiq etish imkonini beruvchi ikki o'lchamli magnit-elastik matematik modeli ishlab chiqildi.

3. Tok o'tkazuvchi paraboloid shaklidagi elastik izotrop qobiqning magnit maydonda deformatsiyalanishini aniqlashga imkon beradigan magnit elastik chegaraviy masala shakllantirilgan.

4. Nostasionar mexanik va elektr-magnit maydonlar ta'sirida bo'lgan qutblanmaydigan va magnitlanmaydigan tok eltuvchi yasovchisi bo'ylab o'zgaruvchan qalinlikli ko'ndalang kesimi ixtiyoriy bo'lgan paraboloid shaklidagi aylanish sirtli qobiq magnit-elastik yechiladigan bog'liqli tenglamalar sistemasi geometrik nohiziqlikni hisobga olib hosil qilindi.

5. Ferromagnit bo'lmagan egiluvchan aylanma paraboloid shakldagi yupqa qobiq magnitoelastik masalasi sonli yechish algoritmi va dasturiy majmuasi ishlab chiqildi.

6. Ferromagnit bo'lmagan tok eltuvchi egiluvchan qobiqqa tashqi begona tokning o'zgarishidan bog'liq ravishda kuchlanganlik-deformasion holati tadqiq qilingan va tashqi begona elektr toki qiymatining oshishi qobiqning kuchlanishi va ko'chishi, Lorens kuchi normal tashkil etuvchisi, magnit induksiyasi, momenti, elektr maydoni kuchlanganligi qiymatlari oshishiga olib kelishi aniqlandi.

7. Konussimon qobiqning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatiga qalinlikning o'zgarish ta'siri tadqiq qilindi.

Qalinlikning o'zgarishi qobiqning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi va buni amaliy masalalarni hisoblashlarda hisobga olish zarurligi olingan natijalardan ko'rinadi.

8. Dissertasiya ishining natijalari Samarqand viloyati «Elektro-magnit moslashuv xizmati» tasarrufida bo'lgan o'lchov qurilmalariga, shuningdek, "O'ZBEKTELEKOM" AK Samarqand filiali Ishtixon tuman telekommunikasiya bog'lamasiga qarashli elektron avtomatik stansiyalarining mikroelementlariga, hamda «AlNet» Shuba Korxonasi soha ish jarayoni elektr ta'minot kurilmalarida ishlatiladigan tranzistorlari tarkibidagi konstruktiv mikroelementlariga joriy etildi. Tok o'tkazuvchi yupqa mikroelementlarning ishlash jarayonlariga joriy qilinishlari natijasida elektromagnit moslashuvlikni hisobga olgan holda, elektromagnit maydoni ta'sirida bo'lgan yupqa tok o'tkazuvchi qobiq shaklidagi mikroelementning geometrik, mexanik va elektromagnit parametrlari uchun ishlab chiqilgan tavsiyalar asosida qobiqning mustahkamligini 8-11 % ga oshirish imkonini berdi.

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

---

**ДЖИЗАКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**ХОЛЖИГИТОВ СОБИР МАМАРАУПОВИЧ**

**МАГНИТОУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПАРАБОЛОИДА  
ВРАЩЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации доктора философии (Doctor of Philosophy) по физико-математическим  
наукам

**Бухара–2024**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована за номером № B2023.4.PhD/FM963 в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

Диссертация выполнена в Джизакском государственном педагогическом университете.

Автореферат диссертации размещен на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) на сайте Ученого совета ([www.bmti.uz](http://www.bmti.uz)) и на образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:** **Индиаминов Равшан Шукурович**  
доктор физико-математических наук (DSc), профессор

**Официальные оппоненты:** **Ходжабеков Мурадjon Усарович**  
доктор физико-математических наук (DSc), доцент  
**Сагдиев Хамидулла**  
кандидат технических наук, доцент.

**Ведущая организация:** **Национальный исследовательский университет "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства"**

Защита диссертации состоится 24 декабря 2024 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 при Бухарском инженерно-технологическом институте (Адрес: 100118, г.Бухара, ул. Каюма Муртазаева 15. Тел.: (+99865) 223-78-84; факс: (+99865) 223-78-84, e-mail: [bmti\\_info@edu.uz](mailto:bmti_info@edu.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Бухарского инженерно-технологического института (зарегистрирована за № 335). Адрес: 100118, г.Бухара, ул.Каюма Муртазаева 15. Тел.: (+99865) 223-78-84).

Автореферат диссертации разослан 12 декабря 2024 года.

(протокол рассылки № 9 от 6 ноября 2024 г.)



**М.Х. Тешаев**

Председатель Ученого совета по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук (DSc), профессор

**З.И. Болтаев**

Ученый секретарь Ученого совета по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук (DSc), профессор

**М.З. Шарипов**

Председатель Научного семинара при Ученом совете по присуждению ученых степеней, доктор физико-математических наук (DSc), профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (Автореферат диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире конкуренция в области внедрения и развития новых технологий очень высока, а инновации, направленные на решение магнитоупругих задач, занимают одно из ведущих мест в обеспечении прогресса промышленных и технологических проектов. Он предполагает исследование магнитоупругой деформации посредством математического моделирования в глобальном масштабе и внедрение новых методов оценки совместного взаимодействия механических и электромагнитных полей. В связи с этим для создания новых инновационных технологий важным для технологических решений является взаимодействие этих сложных физических процессов с механическими, электромагнитными и тепловыми полями.

В мире проводятся научные исследования по термомагнитоупругому взаимодействию конструктивных микроэлементов в виде токопроводящих пластин и оболочек с изменяющимся во времени электромагнитным полем. В связи с этим в данных исследованиях учитывается важность повышения эффективности элементов конструкций, повышения их срока службы и надежности, а также развития передовых технологий, используемых в промышленных и научных технологических процессах. взаимодействия, а также к численному решению задач магнитоупругости с учетом нелинейных факторов, в частности геометрической нелинейности, напряженного состояния и деформирования токоведущих пластин и оболочек.

Также в Республике Узбекистан исследования магнитоупругих взаимодействий направлены на создание новых решений по повышению энергоэффективности технологических систем, а магнитомеханические изменения в системах сбора и обработки энергии позволяют получать больше энергии за счет управления масштабными взаимными силами проводятся научно-исследовательские работы для обеспечения ее эффективности. В Указе Президента Республики Узбекистан от 29 октября 2020 года «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года», среди прочего, «...широкое использование научного и инновационного потенциала, приоритет регулярного реформирование науки в будущем, определение направлений, подготовка самостоятельно мыслящих высококвалифицированных кадров, обладающих современными знаниями...»<sup>2</sup>. При реализации этих задач, среди прочего, разработка новых математических моделей и физических законов путем исследования связей между различными силами взаимодействия и физическими свойствами тела является одной из важных задач обеспечения продвижения технологических проектов.

Данная исследовательская работа служит в определенной степени реализации целей и задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № ПФ-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы», Распоряжение Президента Республики Узбекистан, от 12.02.2018 г. № Р-5209 «О мерах по развитию космических исследований и технологий в Республике Узбекистан», Постановление

---

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № ПФ-6097 от 29 октября 2020 года «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года»

Президента Республики Узбекистан, от 10.02.2021 г. № ПП-4986 от 10 февраля 2021 г. PQ-4986 «О мерах по привлечению инвестиций в дальнейшее развитие информационных технологий и коммуникаций», а также в нормативно-правовых документах, принятых в этой области.

**Соответствие исследованию приоритетному направлению развития науки и технологий республики.** Данное исследование осуществлялось в рамках приоритетного направления развития науки и технологий республики IV «Развитие информации и информационно-коммуникационных технологий».

**Уровень изученности проблемы.** Ряд ученых мира: Kuang Z.B, Eringen A.C., Maugin G.A., Abdalla A.N., Hachkevych O., Ootao Y., Rostami R., Ebrahimi F., Hutter K., Dinzart F., Sarkisyan S.O., Sabar H., Moon F.C., Bian Y.H., Zhao T., Zhupanska O.I., Loos I.I., Bagdasaryan G.E., Kaloyerov S.A., Bardzokas D.I., Ambarsumyan S.A., Belubekyan M.V., Kudryavsev B.A., Parton V.Z., Guz A.N., Maxort F.G., Grigorenko Ya.M., Molchenko L.V. и другие работали и работают по вопросам создания моделей магнитоупругого взаимодействия, разработки точных математических моделей для описания сложных деформационных и напряженных состояний токоведущих пластин и оболочек.

В нашей республике такие ученые как Ширинкулов Т.Ш., Назиров Ш.А., Нуралиев Ф.М., Индиаминов Р.Ш. провели важные научные исследования по математическому моделированию процессов магнито-упругого деформирования упругих тел, методам решения магнитоупругих задач с использованием численного подхода.

Сложные процессы происходят в результате взаимодействия магнитного, электрического и механического полей в упругих телах, находящихся в магнитном поле. Определение нелинейных свойств взаимосвязанных полей и включение их в математические модели является большой проблемой.

При увеличении напряженности поля в различных материалах их механические свойства могут существенно измениться. Анализ магнито-механической зависимости тонких упругих тел, проводящих электрический ток, показывает, что эти вопросы еще не полностью и глубоко изучены.

**Связь диссертационного исследования с исследовательскими планами вуза, в котором выполнена диссертация.** Диссертация включена в план НИР Самаркандского филиала ТУИТ имени Мухаммада ал-Хоразми БВ-Ф4-014 «Развитие математических основ магнитоупругости и прикладных методов решения задачи о магнитоупругих колебаниях тонкостенных элементов электронных устройств, микро- и нано-систем в магнитном поле с учетом электромагнитной совместимости» (2017-2020 гг.) выполнялась в рамках практического гранта А-5-030 «Математическое и программное обеспечение связанных задач магнитотермоупругости анизотропных тел» (2015-2017).

**Цель исследования** - математическое моделирование процесса магнитоупругого деформирования токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения, под действием изменяющихся во времени механических и магнитных полей, совершенствование и развитие теории напряженных и деформационных состояний.

**Задачи исследования:** математическое моделирование магнитоупругого

деформирования токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения, не имеющей свойств поляризации и намагниченности с учетом воздействия изменяющихся механических и электродинамических сил;

построение двумерной модели магнитоупругости токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения;

разработка вычислительных алгоритмов и программного обеспечения для численного решения связанных задач магнитоупругости, позволяющего исследовать напряженное и деформированное состояние гибкой оболочки типа параболоида вращения,;

исследование напряженного и деформированного состояния токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения, изучение электромагнитных и механических эффектов, проведение численных экспериментов и анализ полученных численных результатов.

**Объектом исследования** является процесс магнитоупругого деформирования токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения, в изменяющемся во времени электромагнитном поле.

**Предметом исследования** являются математические модели, алгоритмы расчета, программные средства анализа напряженно-деформационного состояния и электромагнитных эффектов магнитоупругого деформирования токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения.

**Методы исследования.** В процессе исследования использовались методы механики деформируемого твердого тела, а также методы Ньюмарка, методы линеаризации и дискретной ортогонализации.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработана математическая модель магнитоупругого деформирования гибкой оболочки типа параболоида вращения под действием изменяющихся во времени электрических, магнитных и механических полей;

разработана геометрически нелинейная двумерная модель магнитоупругости, позволяющая совместно анализировать деформацию токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения, находящейся под действием магнитного поля, и взаимодействие с электромагнитным полем;

впервые разработаны методики и алгоритмы численного решения связанных задач магнитоупругости токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения;

изучено напряженно-деформационное состояние в зависимости от изменения внешнего стороннего тока и магнитного поля токоведущей тонкой оболочки и определено, что увеличение величины внешнего стороннего электрического тока приводит к увеличению значений напряжения и перемещения оболочки, нормальной составляющей силы Лоренца, магнитной индукции и напряженности электрического поля.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработанные методы решения магнитоупругой задачи токоведущей оболочки позволяют оценить и оптимизировать воздействие магнитного поля на различные металлические конструкции в технологиях индукционной обработки токами высокой частоты;

взаимодействия, связанные с магнитным полем, за счет точного моделирования процессов магнитоупругого деформирования дает

возможность создавать новые технологические решения и повышать эффективность существующих процессов;

**Достоверность результатов исследования** обосновано путем применения методов механики упругих тел и физики магнитных полей, правильной постановки краевой задачи, обеспечения непротиворечивости математических выражений, использования основанных методов решения и оценки точности решений, а также путем их сравнения с другими математическими задачами.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость полученных в исследованиях результатов объясняется их значительным вкладом в развитие теории магнитоупругости тонких пластин и оболочек.

Практическая значимость исследовательской работы объясняется тем, что разработаны многочисленные алгоритмы и программные средства расчета и оценки деформаций и напряжений изотропной оболочки типа параболоида вращения под действием магнитного поля.

**Внедрение результатов исследований.** На основе математических моделей, численных алгоритмов и программных средств, разработанных для исследования магнитоупругого напряженно-деформационного состояния микроэлементов в виде токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения, при воздействии изменяющихся электромагнитных сил, в исследовании:

с целью определения процессов влияния изменяющихся электромагнитных сил на структурные микроэлементы токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения с поперечным сечением с учетом электродинамической и электромагнитной совместимости внедрено в конструкционные микроэлементы, используемые в устройствах измерения электромагнитных волн «Службы электромагнитной адаптации» Самаркандской области, (Справка № 3/17-4/4-10003 от 13.06.2024 Министерства высшего образования, науки и инноваций). В результате на основе разработанных рекомендаций по электромагнитным параметрам токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения с поперечным сечением под действием изменяющихся электродинамических сил прочность тонкой оболочки была увеличена на 6-11 %, разработанные математические и программное обеспечение, позволили сократить время и трудозатраты на инженерные расчеты до 6-8%;

с целью определения колебаний токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения и сложных процессов взаимодействия их с электромагнитным полем, а также для анализа электро-магнитно-механических эффектов, возникающих в оболочках были внедрены в структурный состав диодов и транзисторов электронных устройств, используемых в промышленных процессах предприятия «AlNet» (справка № 3/17-4/4-10003 Министерства высшего образования, науки и инноваций от 13.06.2024). В результате на основе разработанных рекомендаций прочность токонесущих тонких микрооболочек, используемых в устройствах, увеличена на 8-10%, оценка минимизации изгиба тонкой оболочки под действием электромагнитных сил позволила увеличить производительность на 6-8%;

с целью анализа колебаний тонких токонесущих параболоидных микро-элементов с поверхностью вращения, их сложных нестационарных взаимодействий с электромагнитным полем, а также возникающих в них электромагнитных эффектов использованы тонкие токонесущие микро-элементы, используемые в электронных управляющих машинах электронных автоматических станций сети электросвязи Иштихонского района, принадлежащего Самаркандскому филиалу АО «УЗБЕКТЕЛЕКОМ» (справка № 3/17-4/4-10003 Министерства высшего образования, науки и инноваций от 13.06.2024). В результате на основе разработанных рекомендаций прочность токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения повышена на 8-12%, а математическое и программное обеспечение, разработанные с целью достижения минимизации прогиба оболочки дают возможность сократить время и трудозатраты на технические расчеты до 6-8%;

с целью анализа колебаний тонких токонесущих микрооболочек и сложных переменных процессов взаимодействия с электромагнитным полем, а также возникающих в них электромагнитномеханических эффектов внедрены в состав токонесущих тонких конструкционных микроэлементов, используемых в измерительной и испытательной технике в научно-учебной лаборатории, подведомственной кафедре «Радиоэлектроника» Джизакского политехнического института (справка Министерства высшего образования, науки и инноваций № 3/17-4/4-10003 от 13.06.2024 г.). В результате на основе разработанных рекомендаций по электромагнитным параметрам микро-элемента в виде токонесущей тонкой оболочки под действием электродинамических сил прочность оболочки была увеличена на 5-8%, разработанные математическое и программное обеспечение позволило сократить время и трудозатрат на проведение-технических расчетов на -7%;

научные результаты диссертации, такие как математические модели нелинейного упругого деформирования оболочки с поверхностью вращения с учетом эффектов изменения механических сил, вычислительные алгоритмы и программные средства численного решения задач упругости, позволяющие исследовать напряженно-деформационное состояние использованы в фундаментальном проекте ОТ-Ф4-01 «Разработка и теоретическое развитие методов исследования нелинейного динамического напряженно-деформированного состояния криволинейных участков многослойных композитных труб с течением вязкой жидкости под действием температурных и динамических нагрузок», выполненного в 2016-2020 гг. в рамках Государственной научно-исследовательской программы, (Справка Ташкентского химико-технологического института, №1/04-2659 от 16.10.2024). В результате удалось рассчитать напряженно-деформированное состояние подземной изогнутой трубы с многослойной жидкостью, текущей под действием сейсмических и внешних сил.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований обсуждались на 9 научно-практических конференциях, в том числе 7 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследования.** Всего по теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 7 статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации по основным научным результатам

диссертаций доктора философии (PhD) ВАК Республики Узбекистан, 4 из которых были опубликованы в республиканских, 3 в зарубежных журналах, фтфкже получены 2 свидетельства о регистрации программных средств, созданных для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составил 108 страниц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.**

**Во введении** обосновываются актуальность и востребованность исследования по теме диссертации, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, приведена степень изученности проблемы, сформированы цель и задачи, охарактеризованы объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, основана достоверность полученных результатов, раскрыты теоретическая и практическая значимость, внедрение результатов исследования, приведены сведения об опубликованных работах и структуре диссертации.

Первая глава, озаглавленная **«Анализ литературы по проблемам магнитоупругости токоведущих оболочек»** содержит подробный анализ научных источников, посвященных проблемам взаимодействия поля механических деформаций с электромагнитным полем в материалах токопроводящего упругого тела, а также дан обзор работ, посвященных изучению проблем механики взаимосвязанных полей, моделей магнитоупругости пластин и оболочек, решению напряженно-деформированного состояния с использованием аналитических и численных методов.

Новейшие научные исследования в области магнитоупругости направлены на исследование сложных проблем взаимодействия электромагнитных и упругих свойств в новых материалах с различными магнитоупругими свойствами. Из анализа приведенной литературы следует, что проблемы взаимодействия электропроводящих тел, деформируемых под действием изменяющихся во времени электродинамических сил, с электромагнитными полями математически сложны и недостаточно изучены.

Это связано со сложностью системы изначально связанных магнитоупругих дифференциальных уравнений, отсутствием методов и алгоритмов решения подобных задач, что позволило определить цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации, озаглавленной **«Постановка магнитоупругой краевой задачи»**, уравнения механики и электродинамики смежной среды магнитоупругие балансовые соотношения, совместно анализируются уравнения движения упругой среды и система уравнений электромагнитного поля, для уравнений состояния сформулированы магнитомеханические величины, если токнесущая тело находится в магнитном поле, создаются силы, действующие на тело посредством взаимодействия с электромагнитным полем, этими силами являются силы Лоренца, что обусловлено взаимодействием электрического тока с магнитным полем, поляризацией тела, намагниченностью и возникновением электромагнитной энергии в результате

процессов преобразования в механическую энергию, в результате этих воздействий показано, что в теле возникают деформации, напряжения и изменения энергии, создается система уравнений магнитоупругости упругого тела с током и формулируется соответствующая магнитоупругая нелинейная краевая задача.

В данной работе предложена математическая модель магнитоупругого деформирования токонесущего тела, учитывающая электродинамические силы, возникающие в результате взаимодействия магнитного поля и электрического тока в токонесущем теле, помещенном в магнитном поле:

$$\frac{\partial t_{ki}}{\partial x_k} + \rho(F_i + F_i^\wedge) = \rho \frac{dV_i}{dt}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ijk} \frac{\partial H_k}{\partial x_j} = J_i + \frac{\partial D_i}{\partial t}, \quad \frac{\partial B_i}{\partial x_i} = 0, \quad \varepsilon_{ijk} \frac{\partial E_k}{\partial x_j} = -\frac{\partial B_i}{\partial t}, \quad \frac{\partial D_i}{\partial x_i} = \rho_e. \quad (2)$$

$$J_i = \sigma \left( E_i + \varepsilon_{ijk} \frac{\partial u_j}{\partial t} B_k \right) + \rho_e \frac{\partial u_i}{\partial t}, \quad (3)$$

$$D_i = \varepsilon E_i, \quad B_i = \mu H_i, \quad (4)$$

$$\rho F_i^\wedge = \varepsilon_{ilm} J_l B_m + \rho_e E_i, \quad (5)$$

соответственно начальные и граничные условия

$$v_k (t_{ki} + \tau_{ki}) / s_1 = [P_i + v_k \tau_{ki}^{(c)}] / s_1, \quad (6)$$

где

$$\tau_{ki} = E_i D_k + H_i B_k - 1/2 \delta_{ki} (E_j D_j + H_j B_j),$$

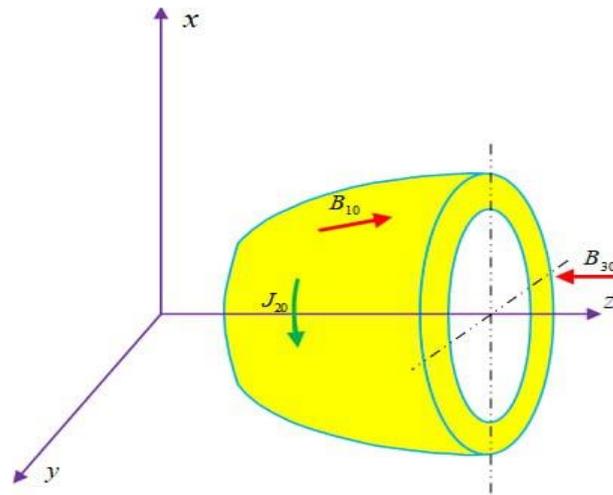
$$\vec{u} = 0, \quad \dot{\vec{u}} = 0, \quad \vec{B} = 0, \quad \vec{B}^{(c)} = 0, \quad \vec{H} = 0, \quad \vec{H}^{(c)} = 0. \quad (7)$$

В соотношениях (1) – (7) введены следующие обозначения: компоненты тензора внутренних напряжений  $t_{ij}$ ; компоненты вектора объемной механической силы  $\rho F_i$ ; Компоненты вектора объемной силы Лоренца  $\rho F_i^\wedge$ ;  $\varepsilon_{ijk}$  – тензор Леви-Чивита; соответственно компоненты напряжения и индукции электрического поля и вектора напряжения и индукции магнитного поля  $E_k, D_k, H_k, B_k, J_k$ ; компоненты вектора полной плотности тока  $J_k = J_k^* + \rho_e V_k$ ; плотность тока передачи  $J_k^*$ ; плотность конвективного тока  $\rho_e V_k$ ; объемная плотность зарядов  $\rho_e$ ; плотность материи в реальном состоянии  $\rho$ ;  $\varepsilon$  – коэффициент электрического проницаемости,  $\mu$  – коэффициент магнитного проницаемости;  $\tau_{ki}, \tau_{ki}^{(c)}$  – тензоры Максвелла в веществе и вакууме;  $P_i$  – составляющая поверхностной силы, соответствующая размерам поверхности в недеформированном состоянии;  $v_k$  – компоненты единичного вектора нормали на деформированной границе тела;  $s_1$  – граничная часть тела с заданными граничными условиями в напряжениях; компоненты вектора скорости  $V_k$ ; полная производная  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V_k \frac{\partial}{\partial x_k}$ ,  $\vec{u}$  – вектор смещения, (c) – индекс указывает на принадлежность величины внешней среде.

Таким образом, в сочетании с соотношениями (1)–(7) формирует математическую модель магнитоупругого деформирования токонесущего тела, учитывающих электродинамических сил, возникающих в результате взаимодействия магнитного поля и электрического тока в токонесущем теле, помещенном в магнитном поле

В третьей главе под названием «**Модель магнитоупругого деформирования гибкой оболочки типа параболоида вращения**» математически

смоделировано магнитоупругое деформирование неполяризованной и ненамагниченной токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения под действием изменяющихся во времени механических и электродинамических сил, кроме того, разработана двумерная модель магнитоупругости, позволяющая исследовать напряженно-деформированное состояние гибкой оболочки типа параболоида вращения с учетом геометрической нелинейности, и система связанных уравнений для решения гибкой оболочки типа параболоида вращения и сформирована нелинейная магнитоупругая краевая задача. Рассмотрим задачу о деформировании неполяризованной и ненамагниченной токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения под действием изменяющихся во времени механических и электродинамических сил (рис. 1).



**Рис.1 . Токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения находящейся под воздействием электромагнитных и механических нагрузок**

Используя гипотезу Кирхгофа-Лява и соответствующие электромагнитные гипотезы, получены связанной системы уравнений магнитоупругости неполяризуемая и ненамагничивающаяся токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения под действием изменяющихся во времени механических и электродинамических сил, связанная система представляет собой двумерную приближенную систему уравнений магнитоупругости, построенные с учетом геометрической нелинейности:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial s}(rN_s) - \cos \varphi N_\theta + \frac{\partial S}{\partial \theta} + \frac{1}{R_s} \frac{\partial H}{\partial \theta} + \frac{r}{R_s} Q_s + r(P_s + \rho F_s^\wedge) &= r\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\
 \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial S}(r^2 S) + \frac{\partial}{\partial s}(\sin \varphi H) + \frac{\cos \varphi}{R_s} H + \\
 + \sin \varphi Q_\theta + r(P_\theta + \rho F_\theta^\wedge) &= r\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\
 \frac{\partial}{\partial s}(rQ_s) + \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} - \frac{r}{R_s} N_s - \sin \varphi N_\theta + r(P_\gamma + \rho F_\gamma) &= r\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \quad (8) \\
 \frac{\partial H}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial s}(rM_s) - \cos \varphi M_\theta - rQ_s - r\left(N_s - \frac{\sin \varphi}{r} M_\theta\right) \vartheta_s - rS\vartheta_\theta &= 0; \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial S}(r^2 H) + \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} - rQ_\theta - r\left(N_\theta - \frac{1}{R_s} M_s\right) \vartheta_\theta - rS\vartheta_s &= 0;
 \end{aligned}$$

$$-\frac{\partial B_\gamma}{\partial t} = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial(rE_\theta)}{\partial s} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_s}{\partial \theta} \right);$$

$$\sigma \left[ E_s - \frac{\partial v}{\partial t} B_\gamma - 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\theta^+ + B_\theta^-) \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial H_\gamma}{\partial \theta} + \frac{H_\theta^+ - H_\theta^-}{h};$$

$$\sigma \left[ E_\theta - \frac{\partial u}{\partial t} B_\gamma + 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_\theta^+ + B_\theta^-) \right] = -\frac{\partial H_\gamma}{\partial s} + \frac{H_\theta^+ - H_\theta^-}{h};$$

выражение деформации через смещение :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ss} &= \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{w}{R_s} + \frac{1}{2} \vartheta_s^2; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\cos \varphi}{r} u + \frac{\sin \varphi}{r} w + \frac{1}{2} \vartheta_\theta^2; \\ \varepsilon_{s\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{v}{r} \right) + \vartheta_s \vartheta_\theta; \quad \chi_{ss} = \frac{\partial v_s}{\partial s}, \quad \chi_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial \theta} + \frac{\cos \varphi}{r} \vartheta_s; \\ \chi_{s\theta} &= \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_s}{\partial \theta} - \frac{\cos \varphi}{r} \vartheta_\theta + \frac{1}{R_s} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{\cos \varphi}{r} v \right) + \frac{\sin \varphi}{r} \frac{\partial v}{\partial s}, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\vartheta_s = -\frac{\partial w}{\partial s} + \frac{u}{R_s}; \quad \vartheta_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\sin \varphi}{r} v$$

углы поворота нормали;  
соотношения эластичности:

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{Eh}{1-\nu^2} [\varepsilon_{ss} + \nu \varepsilon_{\theta\theta}]; \\ N_\theta &= \frac{Eh}{1-\nu^2} [\varepsilon_{\theta\theta} + \nu \varepsilon_{ss}]; \\ S &= \frac{Eh}{2(1+\nu)} \varepsilon_{s\theta}; \quad H = \frac{Eh^3}{12(1+\nu)} \chi_{s\theta}; \\ M_s &= \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} [\chi_{ss} + \nu \chi_{\theta\theta}]; \\ M_\theta &= \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} [\chi_{\theta\theta} + \nu \chi_{ss}]; \end{aligned} \quad (10)$$

Составляющие силы Лоренца имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho F_s^\wedge &= h J_{\theta st} B_\gamma + \sigma h E_\theta B_\gamma + \sigma h \left\{ 0,5 \frac{\partial w}{\partial t} (B_s^+ + B_s^-) B_\gamma - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial u}{\partial t} B_\gamma^2 - \frac{\partial u}{\partial t} \left[ 0,25 (B_\theta^+ + B_\theta^-)^2 + \frac{1}{12} (B_\theta^+ + B_\theta^-)^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial v}{\partial t} \left[ 0,25 (B_s^+ + B_s^-) (B_\theta^+ + B_\theta^-) + \frac{1}{12} (B_s^+ - B_s^-) (B_\theta^+ - B_\theta^-) \right] \right\}; \\ \rho F_\theta^\wedge &= -h J_{sst} B_\gamma - \frac{h}{r\mu} \frac{\partial B_\gamma}{\partial \theta} B_\gamma + \\ &\quad + \sigma_2 h \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} \left[ 0,25 (B_s^+ + B_s^-) (B_\theta^+ + B_\theta^-) + \frac{1}{12} (B_s^+ - B_s^-) (B_\theta^+ - B_\theta^-) \right] - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial v}{\partial t} \left[ 0,25 (B_\theta^+ + B_\theta^-)^2 + \frac{1}{12} (B_\theta^+ - B_\theta^-)^2 \right] - \frac{B_\theta^+ - B_\theta^-}{\mu} B_\gamma \right\}; \\ \rho F_\gamma^\wedge &= 0,5 h [J_{sst} (B_\theta^+ + B_\theta^-) - J_{\theta st} (B_s^+ + B_s^-)] + \frac{h}{2r\mu} \frac{\partial B_\gamma}{\partial \theta} (B_\theta^+ + B_\theta^-) - \\ &\quad - 0,5 \sigma h E_\theta (B_s^+ + B_s^-) + \sigma h \left\{ 0,5 \frac{\partial u}{\partial t} (B_s^+ + B_s^-) B_\gamma - \frac{\partial w}{\partial t} [0,25 (B_s^+ + B_s^-)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{12} (B_\theta^+ - B_\theta^-)^2 + \frac{1}{12} (B_s^+ - B_s^-)^2] \right\} + \frac{(B_\theta^+)^2 - (B_\theta^-)^2}{\mu}. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь:  $N_s, N_\theta$  – нормальные и касательные силы;  $S$  – сдвигающая сила;  $M_s, M_\theta$  – изгибающие моменты;  $H$  – крутящий момент;  $Q_s, Q_\theta$  – поперечные

силы;  $u, v, w$  – компоненты вектора смещения;  $\varepsilon_{ss}, \varepsilon_{\theta\theta}, \varepsilon_{s\theta}, \chi_{ss}, \chi_{\theta\theta}, \chi_{s\theta}$  – компоненты тензора деформаций;  $P_s, P_\theta, P_\gamma$  – механические генераторы энергии;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\mu$  – магнитная восприимчивость.

Полученная система уравнений (8)-(11) представляет собой нелинейные дифференциальные уравнения магнитоупругости неполяризуемой и ненамагничиваемой токнесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения под действием изменяющихся во времени механических и электродинамических сил образует полную закрытую зависимую систему.

Магнитоупругая краевая задача формируется путем добавления к заданным уравнениям начальных и граничных условий.

Четвертая глава диссертации под названием **“Численное решение связанных задач магнитоупругости токнесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения”**, посвящена последовательному применению численных методов при решении граничной задачи нелинейной магнитоупругости неполяризуемой и ненамагниченной токнесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения под действием изменяющихся во времени механических и электродинамических сил, разработке вычислительных алгоритмов численного решения задач, связанных с магнитоупругостью тонких оболочек, исследованию напряженно-деформированного состояния и электромагнитных эффектов.

Численное решение краевой задачи нелинейной магнитоупругости токнесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения основано на последовательном применении конечно-разностной схемы Ньюмарка, методов линеаризации и дискретной ортогонализации, а также применении этих методов состоит из четырех этапов.

На первом этапе с использованием полной системы уравнений (8)-(11) была создана зависимая система, в которой решаются нелинейные дифференциальные уравнения магнито-упругости токнесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения.

При создании зависимой системы все компоненты электромагнитного поля и поля смещений предполагаются независимыми от координаты  $\theta$ .

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0; v = 0; S = 0; H = 0; E_s = 0; B_\theta = 0; P_\theta = 0; \rho F_\theta^\wedge = 0.$$

Заметим, что токнесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения также принадлежит классу гибких оболочек произвольного сечения, и в качестве неизвестных функций берем следующие:

$$u_x, u_z, \vartheta_s, N_x, N_z, M_s, E_\theta, B_z, \quad (12)$$

здесь  $u_x, u_z$  – радиальные и осевые перемещения,  $\vartheta_s$  – угол кручения нормальных,  $N_x, N_z$  – радиальные и осевые силы растяжения,  $M_s$  – изгибающий момент,  $E_\theta$  – напряженность электрического поля,  $B_z$  – индукция магнитного поля.

Эти величины связаны с перемещениями  $u, w$  и силами  $N_s, Q_s$  следующим образом:

$$\begin{aligned} N_x &= N_s \cos \varphi + Q_s \sin \varphi, & u_x &= u \cos \varphi + w \sin \varphi, \\ N_z &= N_s \sin \varphi - Q_s \cos \varphi, & u_z &= u \sin \varphi - w \cos \varphi. \end{aligned} \quad (13)$$

Эти функции позволяют построить алгоритм решения задачи при

выполнении простого условия совместности оболочек вращения произвольного сечения.

В этом случае соотношения эластичности имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ss} &= \frac{1-\nu^2}{Eh} (N_x \cos \varphi + N_z \sin \varphi) - \frac{\nu}{r} u_x, & \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{u_x}{r}, \\ \chi_{ss} &= \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} M_s - \frac{\nu \cos \varphi}{r} \vartheta_s, & \chi_{\theta\theta} &= \frac{\cos \varphi}{r} \vartheta_s, \end{aligned} \quad (14)$$

$$N_\theta = \nu(N_x \cos \varphi + N_z \sin \varphi) + \frac{Eh}{r} u_x, \quad M_\theta = \nu M_s + \frac{Eh^3 \cos \varphi}{12} \vartheta_s.$$

В этом случае  $u_x, u_z$  – компоненты смещения,  $\vartheta_s$  – угол нормального закручивания,  $N_x, N_z$  – компоненты напряжений,  $M_s$  – изгибающий момент,  $E_\theta$  – напряженность электрического поля,  $B_z$  – индукция магнитного поля.

С учетом (13), (14) получим систему решения магнитоупругих дифференциальных уравнений токонесущей гибкой оболочки произвольного поперечного сечения типа параболоида вращения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial s} &= \frac{1-\nu^2}{Eh} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \cos \varphi + \frac{\nu \cos \varphi}{r} u_x + \frac{1}{R_s} u_z - \\ &\quad - \sin \varphi \vartheta_s - \frac{\cos \varphi}{2} \vartheta_s^2 \\ \frac{\partial u_z}{\partial s} &= \frac{1-\nu^2}{Eh} (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \sin \varphi + \frac{\nu \sin \varphi}{r} u_x - \frac{1}{R_s} u_x + \\ &\quad + \cos \varphi \vartheta_s - \frac{\sin \varphi}{2} \vartheta_s^2 \\ \frac{\partial \vartheta_s}{\partial s} &= \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} M_s - \frac{\nu \cos \varphi}{r} \vartheta_s, \\ \frac{\partial N_x}{\partial s} &= \frac{\cos \varphi}{r} (\nu - 1) N_x + \left( \frac{1}{R_s} + \frac{\nu \sin \varphi}{r} \right) N_z + \frac{Eh}{r^2} u_x - (P_r + \rho F_r^\wedge) + \\ &\quad + \rho h \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \cos \varphi + \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \sin \varphi \right), \\ \frac{\partial N_z}{\partial s} &= -\frac{\cos \varphi}{r} N_z - \frac{1}{R_s} N_x - (P_z + \rho F_z^\wedge) + \rho h \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \sin \varphi - \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \cos \varphi \right), \\ \frac{\partial M_s}{\partial s} &= \frac{\cos \varphi}{r} (\nu - 1) M_s + \frac{Eh^3 \cos^2 \varphi}{12} \vartheta_s + \cos \varphi N_x - \sin \varphi N_z + \\ &\quad + (\cos \varphi N_x + \sin \varphi N_z) \vartheta_s - \frac{\nu \sin \varphi}{r} M_s \vartheta_s - \frac{Eh^3 \cos \varphi \sin \varphi}{12} \vartheta_s^2, \\ \frac{\partial E_\theta}{\partial s} &= -\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{\cos \varphi}{r} E_\theta, \\ \frac{\partial B_\gamma}{\partial s} &= -\sigma \mu \left[ E_\theta + 0,5 \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) (B_s^+ + B_s^-) - \mu J_{\theta ct} - \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_z \right] + \frac{B_s^+ - B_s^-}{h} \end{aligned} \quad (15)$$

Компоненты силы Лоренца:

$$\begin{aligned} \rho F_r^\wedge &= h J_{\theta ct} B_\gamma + \sigma h \left[ E_\theta B_\gamma + 0,5 \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) (B_s^+ + B_s^-) B_\gamma - \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_\gamma^2 \right] \\ \rho F_z^\wedge &= -0,5 h J_{\theta ct} (B_s^+ + B_s^-) - \sigma h \{ 0,5 E_\theta (B_s^+ + B_s^-) + \\ &\quad + \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial t} \cos \varphi \right) \left[ 0,25 (B_s^+ + B_s^-)^2 + \frac{1}{12} (B_s^+ - B_s^-)^2 \right] - \end{aligned}$$

$$-0,5 \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} \cos \varphi + \frac{\partial u_z}{\partial t} \sin \varphi \right) B_z (B_s^+ + B_s^-) \}. \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} P_r &= P_s \cos \varphi + P_\gamma \sin \varphi, & P_z &= P_s \sin \varphi - P_\gamma \cos \varphi, \\ F_r^\wedge &= F_s^\wedge \cos \varphi + F_\gamma^\wedge \sin \varphi, & F_z^\wedge &= F_s^\wedge \sin \varphi - F_\gamma^\wedge \cos \varphi. \end{aligned}$$

Численное решение магнитоупругих граничных задач неполяризованной и немагнитиченной токнесущей параболоидной тонкой оболочки с изотропной поверхностью вращения под действием изменяющихся во времени механических и электродинамических сил представляет собой сложный процесс и связано с трудностями математических расчетов. Это объясняется тем, что магнитоупругая (15) разрешимая система токнесущей тонкой параболоидной оболочки с изотропной поверхностью вращения представляет собой систему гиперболо-параболических дифференциальных уравнений восьмого порядка с переменными коэффициентами. Краевую задачу получаем путем добавления к полученной разрешимой системе начальных и граничных условий.

Нелинейную краевую задачу можно записать в векторной форме в следующем виде:

Разрешимая система (15) имеет векторную форму

$$\frac{\partial \vec{N}}{\partial s} = \vec{F} \left( s, t, \vec{N}, \frac{\partial \vec{N}}{\partial t}, \frac{\partial^2 \vec{N}}{\partial t^2} \right), \quad (17)$$

граничные условия

$$g_1 \vec{N}(s_0, t) = \vec{b}_1; \quad g_2 \vec{N}(s_N, t) = \vec{b}_2,$$

и начальные условия когда  $t = 0$       $\vec{N} = 0; \quad \frac{\partial \vec{N}}{\partial t} = 0.$

Здесь:  $\vec{N} = \{u, w, v_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\gamma\}^T$ ;  $\vec{F}$  – нелинейная векторная функция в общем виде;  $g_1, g_2$  –прямоугольные матрицы;  $\vec{b}_1, \vec{b}_2$  –векторная функция.

На втором этапе к нелинейной магнитоупругой краевой задаче применяется конечно-разностная схема Ньюмарка и формируется нелинейная магнитоупругая краевая задача для системы обыкновенных дифференциальных уравнений в соответствующих промежутках времени.

Частные производные по временной координате аппроксимируются конечно-разностными выражениями неявной схемы Ньюмарка:

$$\begin{aligned} \ddot{u}^{t+\Delta t} &= \frac{u^{t+\Delta t} - u^t}{0,25(\Delta t)^2} - \frac{1}{0,25} \left( \dot{u}^t + 0,25\ddot{u}^t \right); \\ \dot{u}^{t+\Delta t} &= \dot{u}^t + 0,5\Delta t(\ddot{u}^t + \ddot{u}^{t+\Delta t}). \end{aligned} \quad (18)$$

После применения схемы Ньюмарка (18) решаемую систему магнитоупругих дифференциальных уравнений (17), можно записать в векторной форме для соответствующих промежутков времени в следующем виде:

$$\frac{\partial \vec{N}}{\partial s} = \vec{F}_1(s, \vec{N}), \quad (19)$$

здесь  $\vec{F}_1$  — вектор восьмого порядка. Граничные условия:

$$D_1 \vec{N}/_{s=s_0} = \vec{d}_1; \quad D_2 \vec{N}/_{s=s_N} = \vec{d}_2 \quad (20)$$

где  $D_1, D_2$  –  $(8 - k) \times 8, (k < 8)$  соответствующие прямоугольные матрицы порядка;  $\vec{d}_1, \vec{d}_2$  –заданные векторы;  $k$  – граничные условия на контуре.

На третьем этапе к нелинейной краевой задаче применяется метод

линеаризации.

Методом линеаризации нелинейная краевая задача (19), (20) сводится к последовательности линейных краевых задач:

$$\frac{\partial \vec{N}^{k+1}}{\partial s} = \vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k); \quad (21)$$

$$\begin{aligned} B_1(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_0) &= \vec{b}_1(\vec{N}^k); \\ B_2(\vec{N}^k) \vec{N}^{k+1}(s_N) &= \vec{b}_2(\vec{N}^k), (k = 0, 1, 2 \dots) \end{aligned} \quad (22)$$

где  $\vec{N} = \{u, w, v_s, N_s, Q_s, M_s, E_\theta, B_\gamma\}^T$ ;  $\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k$  – решения соответственно  $(k + 1)$  – вой и  $k$  – той итераций;  $\vec{G}(\vec{N}^{k+1}, \vec{N}^k)$  – вектор правой части системы уравнений;  $B_1(\vec{N}^k), B_2(\vec{N}^k), \vec{b}_1(\vec{N}^k), \vec{b}_2(\vec{N}^k)$  – соответственно матрицы правой части граничных условий.

Предложенная схема для вычислений очень удобна благодаря квадратичной аппроксимации.

На первом временном шаге в качестве начального приближения в итерационном процессе выбирается решение линейной краевой задачи.

На последующих временных шагах решение, полученное на предыдущем шаге, выбирается в качестве начального решения.

Выбор такой схемы позволяет существенно сократить количество итераций решения задачи.

На заключительном четвертом этапе каждая из линейных краевых задач (21), (22) решалась методом дискретной ортогонализации.

Этот метод обеспечивает устойчивый поток вычислений при ортогонализации векторных решений задачи Коши в отдельно полученных точках интегрирования.

Разработан алгоритм и программный комплекс численного решения магнитоупругих задач неполяризованных и немагнитных токопроводящих тонких оболочек типа параболоида вращения под действием изменяющихся во времени механических и электродинамических сил.

Программный комплекс создан в программной среде «Compaq Visual Fortran» на языке программирования «Visual Fortran».

Проведена оценка сходимости процесса решения задачи на основе приближенных решений, а также анализ достоверности результатов, полученных с помощью сравнений решений при различной математической формулировке задачи.

Рассмотрена задача о деформировании неполяризованной и не намагнитной токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения под действием изменяющихся во времени механических и электродинамических сил.

В процессе деформации форма поверхности токонесущей оболочки типа параболоида вращения изменяется, что приводит к изменению направления протекания тока, то есть изменяется электромагнитное поле оболочки, вихревой ток, взаимодействующий с появлением потоков тока внешнего магнитного поля, которые приводят к появлению сил Лоренца электромагнитного происхождения.

Силы Лоренца изменяют напряженно-деформированное состояние токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения и электро-

магнитного поля в ней.

Уравнения меридианы срединной поверхности гибкой оболочки типа параболоида вращения запишем в параметрической форме следующим образом:

$$r = a\sqrt{z}; \quad z = z \quad (0,1 \leq z \leq 0,5)$$

где  $a$ - параметр оболочки.

В качестве независимой переменной интегрирования выбираем координату  $z$ . Тогда имеем следующие соотношения для геометрических свойств оболочки :

$$\cos\varphi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4z}}; \quad \sin\varphi = \frac{2\sqrt{z}}{\sqrt{a^2 + 4z}}; \quad \frac{1}{R_s} = \frac{2a}{(a^2 + 4z)^{3/2}}$$

Задача решена при граничных условиях:  $s = s_0$  контур малого радиуса  $N_z$  нагружен растяжением и задаётся свободная и изменяющаяся во времени  $B_z = 0,3 \sin \omega t$  магнитная индукция в нормальном направлении, где  $\omega$  – круговая частота с магнитной индукцией  $B_z = 0$ , второй контур  $s = s_N$  жестко закреплен.

На рисунке 2 показано изменение прогиба меридиана оболочки в зависимости от параметра  $a$  в момент времени  $t = 6 \cdot 10^{-3} \text{сек}$ . 1,2,3 варианты соответствует следующим значениям параметра  $a$ :  $a = 15, a = 2, a = 1$ . 1. Первый вариант:  $a = 15$ ; 2. Второй вариант:  $a = 2$ ; 3. Третий вариант:  $a = 1$ . по мере увеличения значений параметра  $a$  увеличиваются и значения наклона оболочки.

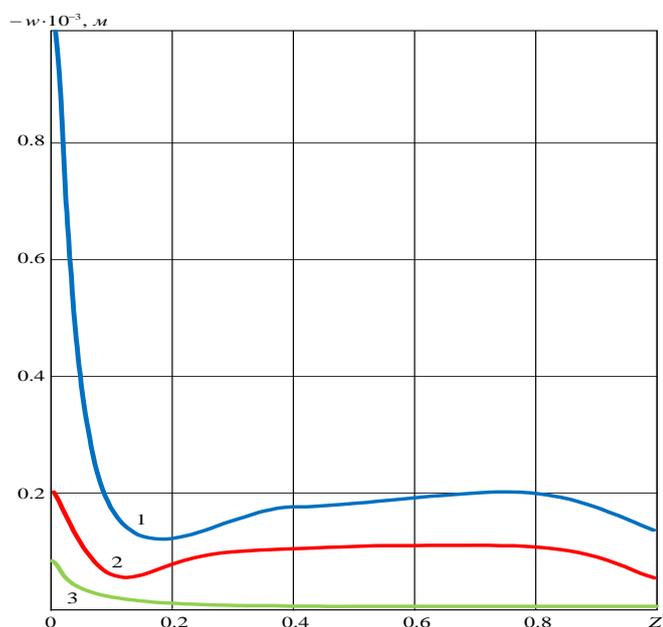
При этом были получены следующие значения плотности постароннего электрического тока, внешнего магнитного поля и механических сил, действующих на оболочку:

$$J_\theta = -5 \cdot 10^{-4} \sin \omega t \text{ A/m}^2, \quad B_{s0} = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ T}, \quad P_0 = 100 \text{ N/m}^2.$$

В токнесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения влияние стороннего электрического тока меняет направление влияния составляющей магнитной индукции по сравнению с наличием и отсутствием ее.

Изменение направления воздействия внешнего магнитного поля не меняет описания состояния магнитной индукции  $B_z$  но существенно увеличивает ее экстремальное значение. Также рассмотрена задача о магнитоупругом деформировании токнесущей оболочки с конической оболочек вращения под действием электромагнитомеханических нагрузок в магнитном поле. Условия закрепления контуров оболочки с конической поверхностью вращения выбраны следующим образом: контур малого радиуса  $s = s_0$  шарнирно закреплен и задаётся изменяющаяся во времени магнитная индукция  $B_z = 0,3 \sin \omega t$ , а второй контур  $s = s_N$  равен нулю когда магнитная индукция которого  $B_z = 0,3 \sin \omega t$  свободна в меридиональном направлении.

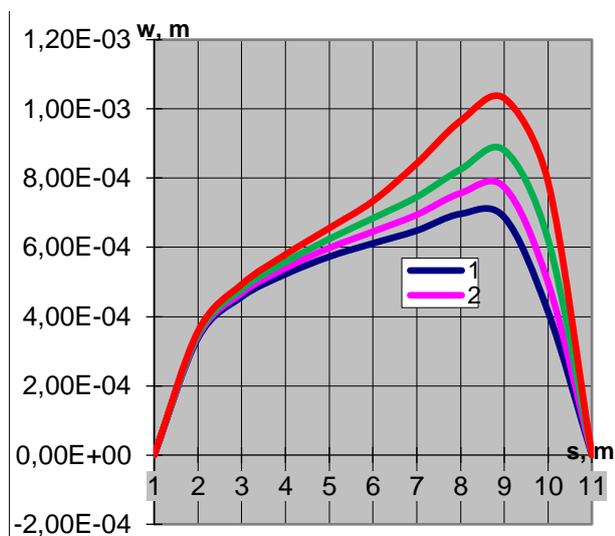
Исследовано влияние изменения толщины на напряженно-деформированное состояние оболочки с конической поверхностью вращения. Толщина в меридиональном направлении конуса меняется как  $h = 3 \cdot 10^{-4} (1 - \alpha^{s/s_N})$ .



**Рис 2. График изменения прогиба оболочки в зависимости от параметра  $\alpha$  в момент времени  $t = 6 \cdot 10^{-3} \text{ sek}$**

Для конуса из бериллия с переменной толщиной  $h = 3 \cdot 10^{-4} (1 - \alpha^S/s_N)$  проводим расчет при разных значениях параметра  $\alpha = \{0,2; 0,3; 0,4; 0,5\}$ , который описывает изменение толщины в меридио-нальном направлении. Решение задачи найдено на промежутке времени  $\tau = 10^{-2} \text{ sek}$ , шаг интегрирования по времени берется  $\Delta t = 1 \cdot 10^{-3} \text{ sek}$ .

На рисунке 3 показано изменение прогиба  $w$  вдоль меридиана оболочки для разных значений параметра  $\alpha$  в момент времени  $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ sek}$ . Графики (1, 2, 3, 4) на рисунке соответствуют значениям параметра  $\alpha = \{0,2; 0,3; 0,4; 0,5\}$ .



**Рис.3. Изменения прогиба  $w$  вдоль меридиана оболочки для различных значений параметра  $\alpha$  в момент времени  $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ sek}$ .**

Установлено, что максимальные значения прогибов по меридиану оболочки возникают приблизительно вблизи значения  $s = 0.04 \text{ m}$ . Такое ограничение объясняется тем, что по условиям левый конец шарнирно закреплен, а правый конец оболочки свободен в меридиональном

направлении. Кроме того, при  $\alpha = 0.5$  толщина оболочки, от левого конца до правого конца, сокращается в два раза. Поэтому максимальные значения прогибов приходятся на правый конец оболочки.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов, в диссертации на тему **“Магнитоупругое деформирование параболоида вращения в магнитном поле”**, были сделаны следующие выводы:

1. Математически смоделировано магнитоупругое нелинейное деформирование токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения под действием электромагнитодинамических сил.

2. С учетом геометрической нелинейности разработана двумерная магнитоупругая математическая модель, позволяющая исследовать напряженно-деформационное состояние токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения под действием электромагнитомеханических сил.

3. Сформулирована нелинейная магнитоупругая краевая задача токонесущей гибкой изотропной оболочки типа параболоида вращения.

4. Получена система магнитоупругих разрешимых зависимых уравнений гибкой оболочки типа параболоида вращения неполяризованного и ненамагничивающегося носителя тока под действием нестационарных механических и электромагнитных полей с учетом геометрической нелинейности.

5. Разработаны алгоритм и программный комплекс численного решения задачи магнитоупругости гибкой оболочки типа параболоида вращения.

6. Исследовано напряженно-деформированное состояние в зависимости от изменения внешнего стороннего тока токонесущей гибкой оболочки типа параболоида вращения, установлено, что увеличение величины внешнего стороннего электрического тока приводит к увеличению значений напряжения и прогиба оболочки, нормальной составляющей силы Лоренца, магнитной индукции, момента, напряженности электрического поля.

7. Изучено влияние изменения толщины на напряженно-деформированное состояние конической оболочки. Из полученных результатов видно, что изменение толщины оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние оболочки, и это необходимо учитывать при расчетах практических задач.

8. Результаты диссертационной работы применены к средствам измерений, находящимся в распоряжении «Службы электромагнитной адаптации» Самаркандской области, а также к микроэлементам электронных автоматических станций, используемые в электронных управляющих машинах электронных автоматических станций сети электросвязи Иштихонского района, принадлежащего Самаркандскому филиалу АО «УЗБЕКТЕЛЕКОМ», а также были использованы в конструкционных микроэлементах транзисторов, используемых в устройствах электропитания в ходе промышленных работ предприятия ООО «АлНет». В результате внедрения в рабочие процессы токонесущих микроэлементов на основе разработанных рекомендаций по геометрическим, механическим и электромагнитным параметрам микроэлемента типа тонкой токонесущей оболочки под воздействием электромагнитного поля позволило повысить прочность оболочки на 8-11%.

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

---

**JIZZAKH STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY**

**KHOLJIGITOV SOBIR MAMARAPOVICH**

**MAGNETOELASTIC DEFORMATION OF A PARABOLOID OF  
REVOLUTION IN A MAGNETIC FIELD**

**01.02.04-Mechanics of a deformable solid**

**DISSERTATION ABSTRACT**  
**for scientific degree Doctor of Philosophy (PhD) in Physical and mathematical sciences**

**Bukhara-2024**

**The theme of the dissertation for Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences was registered under №B2023.4.PhD/FM963 by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan.**

The dissertation has been accomplished at Jizzakh State Pedagogical University.

The dissertation abstract in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been placed on the website of the Scientific Council ([www.bmti.uz](http://www.bmti.uz)) and on the Information-educational portal "ZiyoNet" ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Scientific advisor:** **Indiaminov Ravshan Shukurovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc),  
Professor

**Official opponents:** **Khojabekov Muradjon Usarovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc),  
Associate Professor

**Sagdiev Khamidulla**  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

**Leading organization:** **Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural  
Mechanization Engineers (TIAME)-National  
Research University**

The dissertation defense is to be held on 24<sup>th</sup> December 2024 at 14<sup>00</sup> o'clock at the meeting of the Scientific Council Phd.03/27.02.2021.FM.101.02 at Bukhara Engineering-Technological Institute. (Address: 100118, 15. Qayum Murtazoyev street, Bukhara. Phone: (+99865) 223-78-84; fax: (+99865) 223-78-84, e-mail: [bmti\\_info@edu.uz](mailto:bmti_info@edu.uz))

The dissertation is available at the Information Resource Center of Bukhara Engineering-Technological Institute (registered under No. 335). (Address: 100118, 15. Qayum Murtazoyev street, Bukhara. Phone: (+99865) 223-78-84).

The dissertation abstract was distributed on 12<sup>th</sup> December 2024.

(mailing report № 9 on 6<sup>th</sup> November 2024.)



**M.Kh. Teshayev.**

Chairperson of the Scientific Council  
awarding scientific degrees, Doctor of  
Physical and Mathematical Sciences, (DSc),  
Professor

**Z.I. Boltayev**

Scientific Secretary of the Scientific Council  
awarding scientific degrees, Doctor of  
Physical and Mathematical Sciences, (DSc),  
Professor

**M.Z. Sharipov**

Chairperson of the Scientific Seminar under  
Scientific Council awarding scientific  
degrees, Doctor of Physical and  
Mathematical Sciences (DSc), Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The purpose of the study.** The purpose of the research is to mathematically model the magnetoelastic deformation process of a thin, current-carrying, rotating paraboloid-shaped shell under the influence of time-varying mechanical and magnetic fields, and to improve and develop the theory of stress and deformation states.

### **Research objectives:**

mathematical modeling of the magnetoelastic deformation of a paraboloid-shaped electric current-carrying shell without polarization and magnetization, taking into account the effects of changing mechanical and electrodynamic forces;

construction of a two-dimensional model of magnetoelasticity of a shell with a thin rotating surface carrying an electric current in the form of a paraboloid;

development of computational algorithms and software for numerical solution of connected problems of magnetoelasticity, which allows to study the state of stress and deformation of the paraboloid-shaped flexible rotating surface shell carrying electric current;

researching the stress and deformation states of a thin shell in the form of a rotating paraboloid, studying electromagnetic and mechanical effects, conducting numerical experiments, and analyzing the obtained numerical results.

**The object of research** the process of magnetoelastic deformation of a paraboloid-shaped thin shell with a rotating surface carrying an electric current in a time-varying electromagnetic field was taken as.

**The subject of research** is mathematical models, calculation algorithms, software tools, analysis of stress and deformation states and electromagnetic effects of magnetoelastic deformation of a paraboloid current-carrying rotating surface shell.

**Research methods.** The methods of deformable solid body mechanics, as well as Newmark, linearization and stable discrete orthogonalization methods were used in the research process.

### **The scientific novelty of the research is as follows:**

a mathematical model of magnetoelastic deformation of a rotating paraboloid thin shell under the influence of time-varying electric, magnetic and mechanical fields has been developed;

a geometrically nonlinear two-dimensional model of magnetoelasticity has been developed, which allows to jointly analyze the deformation of the paraboloid current-carrying rotating surface shell located under the magnetic field and the interaction with the electromagnetic field;

For the first time, a methodology and algorithms for numerically solving problems of the magnetoelastic dependence of a current-carrying thin shell in the shape of a circular paraboloid have been developed;

stress-deformation state depending on the change of the external external current and magnetic field to the current-carrying thin shell was studied, and the increase in the value of the external external electric current caused the stress and displacement of the shell, the normal component of the Lorentz force, the magnetic induction, the values of the electric field strength has been found to cause an increase.

**Implementation of the research results.** On the basis of mathematical models, numerical algorithms and software tools developed to study the states of magnetoelastic stress-deformation of microelements in the form of a thin shell with a rotating current-carrying surface during the influence of changing electromagnetic forces in the study:

taking into account the electrodynamic and electromagnetic flexibility, it was introduced to the structural microelements used in the electromagnetic wave measuring devices of the "Electromagnetic Adaptation Service" of the Samarkand region in order to determine the processes of the influence of changing electromagnetic mechanical forces on the structural microelements of a thin shell in the form of a current-carrying cross-section rotating paraboloid (Reference No. 3/17-4/4-10003 dated 13.06.2024 of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation). As a result, on the basis of the recommendations developed for the electromagnetic parameters of the thin shell of the current-carrying cross-section rotating paraboloid under the influence of changing electrodynamic forces, the strength of the thin shell was increased by 6-11%, mathematical and software engineering calculations were created. made it possible to reduce the time and labor cost of transfer by 6-8%;

in order to determine the vibrations of microelements in the form of paraboloid with a current-carrying rotation surface and the complex interaction processes of them with the electromagnetic field, as well as to analyze the electromagnetic-mechanical effects that appear in the shells, the structural composition of the diodes and transistors of the electronic devices used in the field work processes of the Shuba Enterprise "AlNet" introduced to microelements (reference No. 3/17-4/4-10003 of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation dated 13.06.2024). As a result, on the basis of the developed recommendations, the strength of current-carrying thin microshells used in devices has been increased by 8-10%, the assessment of minimizing the bending of the thin shell under the influence of electromagnetic forces has allowed to increase the performance by 6-8%; In order to analyze the vibrations of thin current-carrying microelements in the shape of a paraboloid with a rotating surface, their complex non-stationary interactions with the electromagnetic field, and the electromagnetic effects that appear in them, JSC "UZBEKTELEKOM" Samarkand branch belongs to Ishtikhon district telecommunication network introduced to thin current-carrying microelements used in electronic control machines of electronic automatic stations (reference No. 3/17-4/4-10003 of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation dated 13.06.2024). As a result, on the basis of the developed recommendations, the state of strength of current-carrying shells in the shape of a paraboloid with a rotating surface is increased by 8-12%, and the mathematical and software engineering calculations created in order to achieve the minimization of the bending of the shell are reduced by 6-8%. enabled;

in order to analyze the vibrations of current-carrying thin microshells and the complex variable interaction processes with the electromagnetic field, as well as the electromagnetic-mechanical effects that occur in them, the study in the scientific and educational laboratory under the jurisdiction of the "Radioelectronics" department of the Jizzakh Polytechnic Institute introduced into the current-carrying thin

structural microelements used in measuring and testing devices (reference No. 3/17-4/4-10003 of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation dated 13.06.2024). As a result, on the basis of the recommendations developed for the electromagnetic parameters of the microelement in the form of a current-carrying thin shell under the influence of electrodynamic forces, the strength of the shell was increased by 5-8%, the time and labor required for conducting mathematical and software engineering calculations was achieved. allowed to reduce by -7%;

from the scientific results of the dissertation, such as mathematical models of the non-linear elastic deformation of the rotating surface shell taking into account the effects of changing mechanical forces, computational algorithms and software tools for numerically solving problems of elasticity, which allow researching the state of stress-deformation, State Scientific and Technical Program 2016-2020 as part of OT-F4-01 "Development and theory of methods for studying the nonlinear dynamic stress-strain state of curved sections of multi-layer composite pipes flowing with viscous fluid under the influence of temperature and dynamic loads" was used in the fundamental project on the topic of "development" (Tashkent Institute of Chemical Technology reference number 1/04-2659 dated 10.16.2024). As a result, it was possible to calculate the stress-deformation state of an underground curved pipe with a multilayer liquid flowing under the influence of seismic and external forces.

**The structure and volume of the dissertation.** The composition of the dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of used literature and appendices. The volume of the dissertation was 108 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo‘lim (I часть; I part)**

1. R. Indiaminov, J. Shodmonov, A. Narkulov, R. Butaev, S. Kholjigitov and A. Abdullaev. Mathematical Modeling of Layered Shells Strain in Magnetic Field // Jurnal AIP Conference Proceedings 3147, 030009 (2024). P. 1–7. (№1; Scopus; IF=0,7).

2. R. Indiaminov, R. Butaev, A. Narkulov, N. Yusupov, S. Rustamov, S. Kholjigitov and N. Isayev. Nonlinear Oscillations of a Current-Carrying Shell in Magnetic Field // Jurnal AIP Proceedings 2467, 020013 (2022). P. 1-6. (№1; Scopus; IF=0.7).

3. R. Indiaminov, R. Butaev and S. Kholjigitov. Mathematical simulation of magnetoelastic deformation of nonferromagnetic shells in a nonstationary magnetic field // International Journal of Theoretical and Applied Issues of Digital Technologies Vol. 2 No. 2 (2022). P.32-39. (№15; Directory of Reserch Journals Indexing; IF=0.54).

4. R. Indiaminov and S. Kholjigitov. Mathematical modeling of deformation of a paraboloid of revolution in a magnetic field // International Scientific Journal of “Science and Innovation”. ISSN: 2181-3337. Volume 2, ISSUE 10 october 2023 UIF-2022: 8.2. P.108-112. (№15; Directory of Reserch Journals Indexing; IF=8.2).

5. Kholjigitov S. Deformation of flexible shells in a magnetic field // International Scientific Journal of “Science and Innovation”. –2024. ISSN: 2181-3337.V.3. ISSUE 7.-P.4-8. (№15; Directory of Reserch Journals Indexing; IF=8.2).

6. R. Indiaminov, S. Kholjigitov and A. Djuraev. Magnetoelastic deformation of a truncated flexible paraboloid of rotation in a magnetic field // International Journal of Theoretical and Applied Issues of Digital Technologies ISSN 2181-3086, № 4(6) 2023. –P. 36-42. (№15; Directory of Reserch Journals Indexing; IF=0.54).

7. R. Indiaminov, S. Kholjigitov and A. Narkulov Nonlinear vibrations of a current-carrying anisotropic cylindrical shell in a magnetic field // ISJ Theoretical & Applied Science, 01 (81), - P. 205-211. Philadelphia, USA, 2020. (№1; Web of Science; IF=6,6)

**II bo‘lim (II часть; II part)**

8. R. Indiaminov, A. Narkulov, N. Yusupov, S. Rustamov, R. Butaev, S. Kholjigitov and N. Isayev. Nonlinear oscillations of a current-carrying shell in magnetic field // II International Scientific Conference CAMSTECH-II 2021: Advances in Materials, Systems and Technologies. Camstech-II-1020.

9. Индияминов Р.Ш., Бутаев Р., Холжигитов С. Магнитоупругое деформирование оболочки с учетом ортотропии проводящих свойств // Международная научная конференция «Перспективы применения инновационных и современных информационных технологий в системах образования, науки и управления». Самарканд, 2020. С. 55-60.

10. Индиаминов Р.Ш., Холжигитов С.М. Магнитоупругое деформирование оболочки в магнитном поле // Инновационные подходы в современной науке. сб. ст. по материалам LX междунар. науч.-практ. конф. № 24 (60). Часть 1 –М., Изд. «Интернаука», 2019. –С. 155-161.

11. Индиаминов Р., Абдуллаев А., Шодмонов Ж., Холжигитов С. Математическое моделирование магнитоупругого деформирование нефферромагнитных токопроводящих оболочек в магнитном поле // “Алгоритмы и актуальные проблемы программирования” сборник докладов международная научно-практическая конференция. Карши-2023. –С.453-455

12. Индиаминов Р.Ш., Холжигитов С.М., Юсупов Н.К. Магнито-упругое деформирование тонких оболочек в магнитном поле // Fizika, matematika va mexanikaning dolzarb muammolari, xalqaro ilmiy-amaliy anjumani materiallari (II qism) 24-25-may, Vuxoro 2023. 19-22 b.

13. Indiaminov R. Sh., Xoljigitov S.M., Djurayev A. A., Yusupov N.A. Tok o‘tkazuvchi qobiqning magnitoeastikligi modeli // международной научной конференции «Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности», Ташкент-2023. – С.360–364.

14. Р.Ш. Индиаминов, А.Х. Абдуллаев, А.А. Джураев, С.М. Холжигитов. Моделирование деформирование токопроводящих тел в магнитном поле // «Integration of power and mechanical engineering: innovative technologies and practices» Materials of International scientific & practical conference 24 th of November 2023. Алматы 2023.–С.28–32.

15. Indiaminov R.Sh., Butaev R.B., Xoljigitov S.M., Yusupov N.Q., Zarpullayev U.X. Magnit maydonida yupqa qobiqning deformatsiyalanishi // Mexanika va matematikaning amaliy muammolari, Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari 17-18 may, Toshkent 2024, 241-244 b.

16. Abdullayev O., Xoljigitov S., Butayev R. Maksvell tenglamalarini differensial va integral shaklda yozishi haqida // Matematikani oqitishning dolzarb muammolari va yechimlari respublika ilmiy onlayn anjumani tezislar to‘plami 15-dekabr, Jizzax-2021, 158-162 b.

17. Indiaminov R. Sh, Abdullayev A.A., Xoljigitov S.M. Ferromagnit bo‘lmagan yupqa plastinka shaklidagi tok o‘tkazuvchi mikroelementning deformatsiyalanish holatini tadqiq qilish dasturi // O‘zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligining elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan 16.01.2024 yil o‘tkazilganligi to‘g‘risida guvohnoma. № DGU 32549

18. Indiaminov R. Sh, Shodmonov J.A., Xoljigitov S.M. Magnit maydon tomonidan zaryadli zarrachaga ta’sir etuvchi Lorens kuchini hisoblash dasturi // O‘zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligining elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan 28.02.2024 yil o‘tkazilganligi to‘g‘risida guvohnoma. № DGU 34177



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

**Bosishga ruxsat etildi: 12.12.2024.  
Qog‘oz bichimi 60x84 1/16.  
Temes New Roman garniturasida chop etildi.  
Hajmi 3 bosma taboq. Adadi 100 nusxa. Buyurtma № 277.**

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

