

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ АХБОРОТ-КОММУНИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ
ИЛМИЙ-ИННОВАЦИОН МАРКАЗИ**

БАБАЖАНОВ МУМИН РАЖАБОВИЧ

**АНИЗОТРОП ЖИСМЛАРНИНГ НОЧИЗИКЛИ
ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШ ЖАРАЁНИНИ СОНЛИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

Тошкент – 2021

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

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

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

Бабажанов Мумин Ражабович

Анизотроп жисмларнинг нозикли деформациялариш жараёнини сонли
моделлаштириш.....3

Бабажанов Мумин Ражабович

Численное моделирование процесса нелинейного деформирования
анизотропных тел.....21

Babajanov Mumin Rajabovich

Numerical modeling of the process of nonlinear deformation of anisotropic
bodies.....39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works.....43

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ АХБОРОТ-КОММУНИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ
ИЛМий-ИННОВАЦИОН МАРКАЗИ**

БАБАЖАНОВ МУМИН РАЖАБОВИЧ

**АНИЗОТРОП ЖИСМЛАРНИНГ НОЧИЗИКЛИ ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШ
ЖАРАЁНИНИ СОНЛИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

Тошкент – 2021

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.4.PhD/T1428 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион марказида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

Халджигитов Абдували Абдисаматович
физика - математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Назирова Элмира Шодмоновна
техника фанлари доктори, доцент

Исомиддинов Анвар Иномжонович
техника фанлари бўйича фалсафа доктори

Етакчи ташкилот:

Тошкент давлат транспорт университети

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.13/30.12.2019.T.07.01 Илмий кенгашнинг 2021 йил « 8 » апрель соат 16⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz Тошкент ахборот технологиялари университети).

Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (181 рақам билан рўйхатга олинган.). (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2021 йил «26» март куни тарқатилди.
(2021 йил «26» февраль даги 6 рақамли реестр баённомаси)



Р.Х. Ҳамдамов

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

Ф.М. Нуралиев

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, техника фанлари доктори, доцент

Н. Равшанов

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги пайтда анизотроп жисмларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнини замонавий ахборот технологиялари асосида сонли моделлаштириш, анизотроп хоссаларга эга бўлган композит материалларни тадқиқ қилишда муҳим аҳамият касб этади. Толали ва қатламли янги композит материалларнинг қурилишда, машинасозликда, авиасозликда, тиббиётда, тўқимачилик саноатида ва бошқа турли соҳаларда кенг қўлланилиши, бу соҳадаги илмий тадқиқот ишларини замонавий ахборот технологиялари асосида математик ва сонли моделлаштиришни тақазо этади. Анизотроп жисмларнинг ночизикли деформацияланишини ҳисоблайдиган математик моделлар ва алгоритмлар ишлаб чиқиш муаммолари, АҚШ, Канада, Буюк Британия, Европа Иттифоқи давлатлари, Россия Федерацияси, Япония, Хиндистон, Хитой, Жанубий Корея, Индонезия, Малайзия ва шу каби саноати ривожланган мамлакатларда долзарб ҳисобланади.

«РБК нинг Markets and Markets башоратига асосланиб хабар беришича, композит материалларнинг дунё бозори йилига 8% дан кўпроқ ўсар экан, 2016 йилда 72,58 млрд USD бўлса, 2022 йилда 115,43 млрд USD бўлиши кутилмоқда. "Росатом" нинг шўъба корхонаси "Umatex" маълумотларига кўра, дунёдаги полимер композитлар ишлаб чиқаришнинг 30% дан кўпроғи ёки 4 миллион тоннага яқини турар жой, саноат бинолари, магистрал йўллар, кўприклар ва коммунал инфратузилма қурилишида ишлатилади. Темир-бетон плиталар, углепластиклар ва шишапластиклар каби композитлар қурилишда анча илгаридан кенг қўлланилиб келинмоқда, янги композит материаллар эса жуда кўплаб имкониятларни очиб бермоқда, яъни иссиқлик изоляцияси ва энергия самарадорлигини ошириш, биноларнинг оғирлигини камайтириш ва сейсмик қаршилиқни ошириш, мураккаб меъморий шаклларни яратиш. Металл арматурани композит материалга алмаштириш конструкциянинг хизмат муддатини сезиларли даражада оширишга қодир, арматурали тўрлар йўл қопламаларининг хизмат қилиш муддатини узайтириши мумкин»¹.

Дунёда анизотроп жисмларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнини сонли моделлаштириш бўйича мақсадли илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Янги материалларни ишлаб чиқаришдан олдин, шу жисмнинг кучланганлик-деформацияланиш ҳолатини мукамал ўрганиш, композит материаллардан тайёрланган конструкциялар ва улар элементларининг мустаҳкамлик захирасини ва ишончилигини ўрганиш керак бўлади. Кўп процессорли компьютерлар ва замонавий ҳисоблаш усулларининг пайдо бўлиши фундаментал ва амалий муаммоларни ҳал қилишда сонли моделлаштириш ролининг ошишига олиб келди. Юқори иқтисодий кўрсаткичларга эришиш учун анизотроп жисмларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнини ҳисоблаш моделлари ва алгоритмларини ишлаб чиқишга ва такомиллаштиришга интилиш лозим бўлади.

¹http://www.mrcplast.ru/news-news_open-336238.html

Ўзбекистон Республикаси мустақиллигининг дастлабки йилларидан бошлаб қурилиш, тўқимачилик ва композит материалларни маҳаллийлаштириш бўйича жадал ишлар олиб борилмоқда. Қурилиш, машинасозлик ва халқ хўжалигининг бошқа соҳаларига янги композит материалларни жорий қилиш туфайли ишлаб чиқариш сифати ва ҳажми бир неча баробар ошди. Ушбу диссертация иши маълум маънода, 2017-2021 йиллардаги Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги, 2017 йил 30 июндаги ПФ-5099-сон «Республикада ахборот технологиялари соҳасини ривожлантириш учун шарт-шароитларни тубдан яхшилаш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалиётга жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги қарорларидаги ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни бажаришга хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV. «Математика, механика ва информатика» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Анизотроп жисмларнинг нозикли деформацияланиш жараёни ўрганиш математик моделлаштириш ва пластиклик назариясининг фундаментал муаммоларидан ҳисобланади. Бу масалалар Сен-Венан, Г.Генки, В.Геогджаев, Р.Друккер, А.Ильюшин, П.М.Нахди, Л.М. Качанов каби таниқли олимлар ва бошқаларнинг классик ишларида ўрганилган. Композит материалларга бўлган катта талаб ва эҳтиёж, анизотроп жисмларда кечадиган нозикли деформацияланиш жараёнини математик моделлаштириш соҳасидаги илмий тадқиқотларнинг ривожланишига тўртки бўлди. Композит материалларни табиий (кристаллар, графитлар, тоғ жинслари, ғўла) ва сунъий (темир-бетон, углепластик, шишапластик) тоифаларга ажратиш мумкин. Сунъий композитлар ичида энг кўп ишлатиладигани толали ва қатламли композитлар ҳисобланади.

Композит материаллар соҳасида илмий иш олиб борган таниқли мутахассислар қаторида қуйидаги олимларни таъкидлаш мумкин, Дж.Абоуди, В.А.Ломакин, Р.Хилл, Б.Е.Победря, И.Н.Гольденблат, С.Шешенин, А.Солодовников ва бошқалар. Сўнги йилларда температурани ҳисобга олган ҳолда, боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган пластик деформацияланиш жараёнини математик моделлаштириш масалаларига қуйидаги муаллифларнинг ишлари бағишланган В.Новацкий, Н.М.Youssef, Sloderbach Z., Pajak J., Abbas I.A. ва бошқалар. Ўзбекистонда эластик-пластик масалаларни математик моделлаштириш ва уларни ечиш усуллари билан В.Қабулов, Т.Буриев, Б.Қурманбаев, А.Ахмедов, А.Халджигитов, Р.Абиров, А.Полатов ва бошқа муаллифлар шуғулланишган.

Адабиётларни ўрганиш ва таҳлил қилиш, анизотроп жисмлар учун термо-эластик-пластик масалаларни сонли моделлаштириш ва уларнинг дастурий воситаларини ишлаб чиқиш етарли даражада ўрганилмаганлигини ва долзарб муаммолигини кўрсатади.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Муҳаммад Ал-Хоразмий номидаги Тошкент ахборот технологиялари университетининг илмий тадқиқот ишлари режасининг қуйидаги давлат грантлари: Ф4-014 «Анизотроп жисмлар учун термопластик ва термовязкопластик боғлиқ масалалар» (2012-2016), А5-031 «Лойиҳаларни автоматлаштириш ва техник иншоотларни таҳлил этиш учун дастурий мажмуа яратиш» (2012-2014) доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади анизотроп жисмларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнини ифодаловчи математик моделлар, сонли алгоритмлар ва дастурий воситаларни ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

деформацион назария асосида трансверсал изотроп жисмларнинг пластик ва термопластик деформацияланишини ифодаловчи модел тенгламаларни ишлаб чиқиш;

термо-эластик-пластик статик, динамик, боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган масалаларни сонли ечиш учун чекли айирмали тенгламалар куриш;

анизотроп жисмларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнини ифодаловчи модел тенгламаларни ечиш учун самарали сонли усулни куриш;

механик ва температуравий кучлар таъсиридаги анизотроп жисмларнинг кучланганлик–деформацияланиш ҳолатини тадқиқ қилишга имкон берадиган пластик, термопластик боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган чегаравий масалаларни сонли ечиш учун ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий восита ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти термо-эласто-пластик трансверсал изотроп материаллардан ташкил топган конструкцияларнинг статик ва динамик деформацияланиш жараёнларидан иборат.

Тадқиқотнинг предмети термоэластикпластиклик назариясининг статик, динамик, боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган чегаравий масалалари кўринишида ифодаланган анизотроп жисмларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнларини сонли моделлаштиришдан иборат.

Тадқиқот усуллари. Диссертация ишини бажаришда деформацияланувчи қаттиқ жисм механикасининг умумий қонунлари, математик моделлаштириш усуллари, сонли усуллар, ошкор ва ошкормас айирмали схемалар, айирмали тенгламаларни ечишнинг итерацион усуллари, модулли ва структурали дастурлаш технологиялари, ҳисоблаш эксперименти ва ҳисоблаш натижаларини визуаллаштириш технологияларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

механик ва температуравий бошланғич ва чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда деформацион назарияси асосида трансверсал изотроп жисмлар

(композит материаллар)нинг пластик ва термопластик деформацияланиш жараёнларининг математик моделлари ишлаб чиқилган;

термомеханик кучларни ҳисобга олган ҳолда анизотроп жисмларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнининг модел тенгламаларини ечишнинг чекли айирмали самарали сонли усули ишлаб чиқилган;

термо-эластик-пластик статик, динамик, боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган масалаларни сонли ечишни ҳисобга олган ҳолда ошкор ва ошкор бўлмаган тўр тенгламалар қурилган;

механик ва температуравий кучларни ҳисобга олган ҳолда анизотроп жисмнинг кучланган–деформацияланганлик ҳолатини пластик, термопластик боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган чегаравий масалаларни сонли ечишга мўлжалланган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалари ва унинг структураси ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

трансверсал изотроп жисмларнинг эластик–пластик деформацияланишини ҳисобловчи алгоритм ва дастурий восита ишлаб чиқилган;

ишлаб чиқилган дастурий восита ёрдамида статик ва динамик термомеханик кучлар таъсирида трансверсал изотроп материаллардан ташкил топган конструкциялар ва улар қисмларининг мустаҳкамлиги ва ишончилиги аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги математик мулоҳазаларнинг қатъийлиги, термодинамика қонунларига қатъий риоя қилинганлиги, пластик ва термопластик чегаравий масалаларнинг сонли натижаларини ва аниқ ечимлар билан солиштирилганлиги ҳамда ҳисоблаш экспериментларни ўтказиш орқали асосланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти таклиф қилинаётган сонли усулдан нафақат эластик-пластик ва термопластик чегаравий масалаларни сонли ечишда, шунингдек, математик моделлаштириш ва туташ муҳитлар механикасининг бошқа масалаларини ечишда фойдаланиш мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамиятини, эластик-пластик ва термопластик масалаларни ечиш учун таклиф этилган сонли усулдан ва олинган сонли натижалардан термомеханик кучлар таъсиридаги анизотроп материаллардан ташкил топган замонавий техник объектлар ва иншоотлар мустаҳкамлиги захираларини ва ишончилигини аниқлашда ва сонли моделлаштиришда фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Анизотроп жисмларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнини тадқиқ этиш учун ишлаб чиқилган математик моделлар, сонли ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалар бўйича олинган илмий янгиликлар асосида:

механик ва температуравий кучлар остидаги анизотроп жисмнинг кучланганлик–деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилишга имкон берадиган пластик, термопластик боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган чегаравий масалаларни сонли ечишга мўлжалланган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий

воситалар Хоразм вилояти Боғот тумани «Архитектура ва қурилиш бўлими» объектларига жорий этилган (Курилиш Вазирлиги маълумотнома № 10159/09-07-сон, 23.12.2019 й., Ахборот Технологиялари ва Коммуникацияларини Ривожлантириш Вазирлиги маълумотнома № 33-8/9024-сон, 23.12.2019 й.). Натижада иш унумдорлигини 8-10% га ошириш, сарф харажатларни эса 7-10% га қисқартириш имконияти берилган.

кучланиш ва температуранинг тақсимланиши ва анизотропликнинг трансверсал изотроп жисмларнинг кучланганлик–деформацияланганлик ҳолатига ва пластик соҳаларни аниқлашга мўлжалланган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалар Самарқанд вилояти Жомбой туманидаги «DAMIR QURILISH SERVIS» МЧЖ объектларига жорий этилган (Курилиш Вазирлиги маълумотнома № 10159/09-07-сон, 23.12.2019 й., Ахборот Технологиялари ва Коммуникацияларини Ривожлантириш Вазирлиги маълумотнома № 33-8/9024-сон, 23.12.2019 й.). Натижада, иш унумдорлигини 10-15% га ошириш, сарф харажатларни эса 10-15% га қисқартириш имконияти берилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация иши натижалари 8 та халқаро ва 3 та республика миқёсидаги конференцияларда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 25 та илмий иш жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестацияси комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 10 та мақола, жумладан 3 та чет эл ва 7 та республика журналларида нашр этилган, шунингдек 2 та ЭҲМ учун дастурий маҳсулотларга гувоҳномалар олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, 3 та боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, шартли белги ва терминлар ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 101 саҳифадан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мос эканлиги асосланиб, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқотнинг объекти ва предмети кўрсатиб берилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган ва назарий ҳамда амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижалари амалиётга жорий этилганлиги, чоп этилган ишлар ҳақида маълумотлар ва диссертациянинг тузилиши келтириб ўтилган.

Диссертациянинг биринчи «**Анизотроп жисмлар чизиксиз деформацияларининг математик моделлари**» номли бобида, дастлабки зарур маълумотлар, асосий тушунчалар, асосий аниқловчи муносабатлар, анизотроп

жисмнинг чизикли ва чизиксиз деформацияланишини ифодаловчи математик моделлар келтирилган.

1.1 параграфда анизотроп жисмнинг чизикли ва ночизикли деформацияланишини ифодаловчи математик моделлар қурилган. Эластиклик назариясига асосланган чегаравий масала кўчишларга нисбатан ифодаланган мувозанат тенгламаси ва мос чегаравий шартлар билан ифодаланган:

$$\sum_{j,k,l=1}^3 C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + X_i = 0, \quad x_i \in V, \quad (1)$$

$$u_i|_{\Sigma_1} = u_i^0, \quad x_i \in \Sigma_1, \quad (2)$$

$$\sum_{k,l,j=1}^3 C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} n_j \Big|_{\Sigma_2} = S_i^0, \quad x_i \in \Sigma_2, \quad (3)$$

бунда, u_i - кўчиш вектори, X_i, S_i - ҳажмий ва сирт кучлари, Σ_1, Σ_2 - V ҳажм сирти Σ нинг қисм сиртлари, n_j - V ҳажмнинг Σ_2 сиртига ўтказилган ташқи нормал, C_{ijkl} - эластик константалар тензори бўлиб, қуйидаги мусбат аниқланганлик ва симметриклик хоссаларига эга:

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{klij}, \quad C_{ijkl} a_{ij} a_{kl} \geq 0, \quad a_{ij} = a_{ji}. \quad (4)$$

C_{ijkl} тензори (4) симметриклик шарти бажарилганда 9 та эркин эластик константаларга эга бўлади ва булар ортотроп материални ифодалайди, агар тензор кўшимча қуйидаги симметриклик шартларини ҳам бажарса

$$C_{1133} = C_{2233}, \quad C_{2323} = C_{1313}, \quad C_{1212} = \frac{1}{2}(C_{1111} - C_{2211}).$$

у ҳолда эркин эластик константалар сони 5 га тенг бўлади ва бунга мос материал трансверсал изотроп жисм бўлади.

(1)-(3) эластик чегаравий масаладаги, кучланиш ва деформация тензори орасидаги муносабатни қуйидаги

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - \sigma_{ij}^p, \quad (5)$$

муносабатга алмаштирсак, анизотроп жисмнинг ночизикли деформацияланишини ифодаловчи математик моделга эга бўламиз, бунда σ_{ij}^p - кучланиш тензорининг ночизикли қисми.

1.2 параграфда трансверсал изотроп жисм учун ночизикли чегаравий масала қурилган ва уни қуйидагича кўринишда ифодалаш мумкин:

$$\sum_{j,k,l=1}^3 C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} + X_i = f_i, \quad (6)$$

$$u_i|_{\Sigma_1} = u_i^0, \quad x_i \in \Sigma_1, \quad (7)$$

$$\sum_{k,l,j=1}^3 C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} n_j \Big|_{\Sigma_2} = S_i + \varphi_i, \quad x_i \in \Sigma_2, \quad (8)$$

бунда f_i ва φ_i лар қуйидаги муносабатлар билан аниқланган

$$f_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}^p}{\partial x_j}, \quad p \geq p^*, \quad q \geq q^*, \quad \varphi_i = \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij}^p n_j \Big|_{\Sigma_2}, \quad p \geq p^*, \quad q \geq q^*,$$

бу муносабатлар (6) тенгламанинг ва (8) чегаравий шартнинг ночизиқли қисмини ифодалайди. Бу функцияларнинг қиймати нолга тенг бўлса, (6-8) чегаравий масала эластиклик назариясининг чизиқли чегаравий (1-3) масаласига келиб қолади.

Эътибор қилсак, (5) муносабатдаги катталиқ σ_{ij}^p – трансверсал изотроп жисм учун пластиклик назарияси модел тенгламасининг ночизиқли қисмини ифодалайди, яъни

$$\sigma_{ij}^p = \begin{cases} 0, & \text{агар } p < 0 \text{ у } q < 0, \\ 2(\lambda_2 - \lambda_2')(1 - \frac{p}{p^*})p_{ij}, & \text{агар } p \geq p^*, \\ 2(\lambda_5 - \lambda_5')(1 - \frac{q}{q^*})q_{ij}, & \text{агар } q \geq q^*, \end{cases}$$

p^*, q^* - трансверсал изотроп жисмнинг мос равишда бўйлама ва кўндаланг йўналишдаги эластиклик чегаралари,

$$p_{ij} = \varepsilon_{ij} + \frac{\tilde{\theta}}{2}(\delta_{i3}\delta_{j3} - \delta_{ij}) + \varepsilon_{33}\delta_{i3}\delta_{j3} - (\varepsilon_{i3}\delta_{j3} + \varepsilon_{3j}\delta_{i3})$$

$$q_{ij} = \varepsilon_{i3}\delta_{j3} + \varepsilon_{3j}\delta_{i3} - 2\varepsilon_{33}\delta_{i3}\delta_{j3}, \quad \tilde{\theta} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}$$

Эластик ўзгармаслар $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$, эластик тензор компоненталари билан қуйидагича боғланган

$$\lambda_1 = C_{2211}, \lambda_2 = C_{1212}, \lambda_3 = C_{1133}, \lambda_4 = C_{3333}, \lambda_5 = C_{1313},$$

$$\lambda_6 = \lambda_7 = \lambda_1 + 2\lambda_2 = C_{2211} + 2C_{1212}, \lambda_8 = \lambda_3 = C_{1133}, \lambda_9 = \lambda_5 = C_{1313}.$$

1.3 параграфда трансверсал изотроп жисмлар учун термопластик чегаравий масалалар қурилган ва у қуйидаги ҳаракат тенгламаси

$$\sum_{j=1}^3 \sigma_{ij,j} + X_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (9)$$

термопластик деформациянинг ҳолат тенгламаси

$$\sigma_{ij} = C_{ijke}\varepsilon_{kl} - \beta_{ij}(T - T_0)\delta_{ij} - 2(\lambda_2 - \lambda_2')(1 - \frac{p}{p^*})p_{ij} - 2(\lambda_5 - \lambda_5')(1 - \frac{q}{q^*})q_{ij}, \quad (10)$$

$$p \geq p^*, \quad q \geq q^*,$$

Коши муносабати

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2}(u_{k,l} + u_{l,k}), \quad (11)$$

анизотроп жисмлар учун иссиқлик тарқалиш тенгламаси

$$\lambda_{ij}T_{,ij} - c_\varepsilon \dot{T} - T \cdot \beta_{ij} \cdot \dot{\varepsilon}_{ij} = 0, \quad (12)$$

бошланғич шартлар

$$u_i|_{t=t_0} = \varphi_i, \quad \dot{u}_i|_{t=t_0} = \psi_i, \quad T|_{t=t_0} = T_0, \quad (13)$$

ва чегаравий шартлардан ташкил топган

$$u_i|_{\Sigma_1} = u_i^0, \quad T|_{\Sigma} = \bar{T}_0, \quad \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij}n_j|_{\Sigma_2} = S_i^0. \quad (14)$$

Бунда σ_{ij} , ε_{ij} – кучланиш ва деформация тензори, ρ – зичлик, T – температура, c_ε – ўзгармас деформацияда иссиқлик сифими, β_{ij} – иссиқлик кенгайиши тензори, λ_{ij} – иссиқлик оқимининг тензори, δ_{ij} – Кронекер символи.

Иккинчи боб «Анизотроп жисмлар учун пластик масалаларнинг сонли моделлари ва ечиш усуллари» деб номланган бўлиб, термо-эластик-пластик чегаравий масалаларнинг дискрет аналогини қуришга бағишланган. Ҳосил қилинган чекли айирмали тенгламалар учун самарали сонли алгоритмлар ишлаб чиқилган.

2.1 параграфда трансверсал изотроп жисмлар деформацион назариясига асосланган чегаравий масала учун нозизиқли чекли-айирмали тенгламалар қурилган. Бунда (6) дифференциал тенглама декарт координталар системаси OX_i даги параллелепипедда қаралган. Чекли-айирмали тенгламалар қуриш учун параллелепипеднинг қирралари l_i узунлиги $h_i = l_i / N_i$ қадам билан N_i та бўлакка $x_i = kh_i$, $k = 0, N_i$, $i = 1, 2, 3$ тугун нуқталар билан ажратилган. Натижада (6) тенгламалардаги ҳосилаларни чекли-айирмали муносабатларга алмаштириб ва уларни $u_{i,j,k}$, $v_{i,j,k}$ ва $w_{i,j,k}$ тугун нуқталарда аниқланган функцияларга нисбатан ечиб қуйидаги итерацион жараённи ташкил қиламиз:

$$u_{i,j,k}^{(n+1)} = \left[\frac{C_{1111}}{h_1^2} (u_{i+1,j,k}^{(n)} - u_{i-1,j,k}^{(n)}) + \frac{C_{1212}}{h_2^2} (u_{i,j+1,k}^{(n)} + u_{i,j-1,k}^{(n)}) + \frac{C_{1313}}{h_3^2} (u_{i,j,k-1}^{(n)} + u_{i,j,k+1}^{(n)}) + \right. \\ \left. + \frac{C_{1122} + C_{1212}}{4h_1h_2} (v_{i+1,j+1,k}^{(n)} - v_{i+1,j-1,k}^{(n)} - v_{i-1,j+1,k}^{(n)} + v_{i-1,j-1,k}^{(n)}) + \frac{C_{1133} + C_{1313}}{4h_1h_3} \times \right. \\ \left. \times (w_{i+1,j,k+1}^{(n)} - w_{i+1,j,k-1}^{(n)} - w_{i-1,j,k+1}^{(n)} + w_{i-1,j,k-1}^{(n)}) - f_{i,j,k} \right] / \left(\frac{2C_{1111}}{h_1^2} + \frac{2C_{1212}}{h_2^2} + \frac{2C_{1313}}{h_3^2} \right).$$

$v_{i,j,k}^{(n+1)}$ ва $w_{i,j,k}^{(n+1)}$ лар учун муносабатларни юқорида кўрсатилган каби топиб олишимиз мумкин. Чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда, дастлабки нолинчи яқинлашишда кўчишларни ички нуқталарда нолга тенг деб ҳисоблаймиз. $f_{1,i,j,k}$, $f_{2,i,j,k}$, $f_{3,i,j,k}$ кўшилувчилар фақат эластиклик чегарасидан ошиб кетиш $p \geq p^*$, $q \geq q^*$ шарти бажарилганда ҳисобланади. Айирмали схеманинг аппроксимация тартиби $O(h_1^2, h_2^2, h_3^2)$ га тенг.

2.2 параграфда трансверсал изотроп жисмнинг боғлиқ бўлмаган термопластик чегаравий масалалари учун чекли-айирмали тенгламалар ва сонли алгоритмлар қурилган. Боғлиқ бўлмаган термопластик чегаравий масала қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\begin{aligned} C_{1111} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + C_{1212} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + C_{1313} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (C_{1122} + C_{1212}) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + (C_{1133} + C_{1313}) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} - \beta_{11} \frac{\partial T}{\partial x} - f_1 &= 0, \\ C_{1212} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + C_{2222} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + C_{2323} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + (C_{2211} + C_{1212}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + (C_{2233} + C_{2323}) \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} - \beta_{22} \frac{\partial T}{\partial y} - f_2 &= 0, \\ C_{1313} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + C_{2323} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + C_{3333} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + (C_{3311} + C_{1313}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + (C_{3322} + C_{2323}) \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} - \beta_{33} \frac{\partial T}{\partial z} - f_3 &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

фараз қилайлик чегаравий шартлар қуйидагича (параллелепипед барча ёқлари бўйича маҳкамланган), яъни

$$\begin{aligned}
u|_{0,l_1} = 0, \quad v|_{0,l_1} = 0, \quad w|_{0,l_1} = 0, \\
u|_{0,l_2} = 0, \quad v|_{0,l_2} = 0, \quad w|_{0,l_2} = 0, \\
u|_{0,l_3} = 0, \quad v|_{0,l_3} = 0, \quad w|_{0,l_3} = 0.
\end{aligned}
\tag{16}$$

Параллелепипеднинг ичидаги температура майдони қуйидаги қонуният билан тақсимланган бўлсин

$$T(x, y, z) = T_0 \sin\left(\frac{\pi x}{l_1}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{l_2}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{l_3}\right), \tag{17}$$

бу ерда $\beta_{11} = \beta_{22}, \beta_{33}$ - трансверсал изотроп жисмнинг иссиқлик кенгайиши коэффициентлари.

(15) тенгламалардаги ҳосилаларни чекли-айирмали муносабатларга алмаштириб ва уларни $u_{i,j,k}$, $v_{i,j,k}$ ва $w_{i,j,k}$ тугун нуқталарда аниқланган функцияларга нисбатан ечиб қуйидаги итерацион жараённи ташкил қиламиз:

$$\begin{aligned}
u_{i,j,k}^{(n+1)} = & \left[\frac{C_{1111}}{h_1^2} (u_{i+1,j,k}^{(n)} - u_{i-1,j,k}^{(n)}) + \frac{C_{1212}}{h_2^2} (u_{i,j+1,k}^{(n)} + u_{i,j-1,k}^{(n)}) + \frac{C_{1313}}{h_3^2} (u_{i,j,k+1}^{(n)} + u_{i,j,k-1}^{(n)}) + \right. \\
& + \frac{C_{1122} + C_{1212}}{4h_1h_2} (v_{i+1,j+1,k}^{(n)} - v_{i+1,j-1,k}^{(n)} - v_{i-1,j+1,k}^{(n)} + v_{i-1,j-1,k}^{(n)}) + \frac{C_{1133} + C_{1313}}{4h_1h_3} (w_{i+1,j,k+1}^{(n)} - w_{i+1,j,k-1}^{(n)} - \\
& \left. - w_{i-1,j,k+1}^{(n)} + w_{i-1,j,k-1}^{(n)}) - \frac{\beta_{11}}{h_1} (T_{i+1,j,k}^{(n)} - T_{i,j,k}^{(n)}) - f_{i,j,k} \right] / \left(\frac{2C_{1111}}{h_1^2} + \frac{2C_{1212}}{h_2^2} + \frac{2C_{1313}}{h_3^2} \right).
\end{aligned}$$

Юқорида кўрсатилгани каби $v_{i,j,k}^{(n+1)}$ ва $w_{i,j,k}^{(n+1)}$ лар учун ҳам муносабатларни топиб олишимиз мумкин.

2.3 параграфда трансверсал изотроп жисмлар учун боғлиқ динамик термо-пластик чегаравий масалани чекли-айирмали тенгламалари ва уларни сонли ечиш алгоритлари ишлаб чиқилган. Боғлиқ динамик термопластик (9-14) чегаравий масалани қуйидаги бошланғич

$$\begin{aligned}
u(x, y, z, t)|_{t=0} = u^0, \quad v(x, y, z, t)|_{t=0} = v^0, \quad w(x, y, z, t)|_{t=0} = w^0, \\
\frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = \varphi_1, \quad \frac{\partial v}{\partial t}|_{t=0} = \varphi_2, \quad \frac{\partial w}{\partial t}|_{t=0} = \varphi_3, \quad T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0.
\end{aligned}
\tag{18}$$

ва чегаравий шартлар

$$\begin{aligned}
u(x, y, z, t)|_{\Sigma} = u^1, \quad v(x, y, z, t)|_{\Sigma} = v^1, \\
w(x, y, z, t)|_{\Sigma} = w^1, \quad T(x, y, z, t)|_{\Sigma} = T_1.
\end{aligned}$$

билан трансверсал изотроп параллелепипедда қараймиз.

(9) тенгламадаги ва (18) бошланғич шартлардаги ҳосилаларни чекли-айирмали муносабатлар билан алмаштириб ва уларни $u_{i,j,k}^{n+1}$, $v_{i,j,k}^{n+1}$, $w_{i,j,k}^{n+1}$ ва $T_{i,j,k}^{n+1}$ тугун нуқталарда аниқланган функцияларга нисбатан ечиб қуйидаги рекуррент муносабатларни ҳосил қиламиз:

$$u_{i,j,k}^{n+1} = \frac{\tau^2}{\rho} \left[C_{1111} \frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{h_1^2} + C_{1212} \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{h_2^2} + C_{1313} \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{h_3^2} + \right. \\ \left. + (C_{1122} + C_{1212}) \frac{v_{i+1,j+1,k}^n - v_{i-1,j+1,k}^n - v_{i+1,j-1,k}^n + v_{i-1,j-1,k}^n}{4h_1h_2} + (C_{1133} + C_{1313}) \times \right. \\ \left. \times \frac{w_{i+1,j,k+1}^n - w_{i-1,j,k+1}^n - w_{i+1,j,k-1}^n + w_{i-1,j,k-1}^n}{4h_1h_3} - \beta_{11} \frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i-1,j,k}^n}{2h_1} - f_{i,j,k} \right] + 2u_{i,j,k}^n - u_{i,j,k}^{n-1} \quad (19)$$

$$T_{i,j,k}^{n+1} = \frac{\tau}{c_\varepsilon} \left[\lambda_{11} \frac{T_{i+1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n}{h_1^2} + \lambda_{22} \frac{T_{i,j+1,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j-1,k}^n}{h_2^2} + \right. \\ \left. + \lambda_{33} \frac{T_{i,j,k+1}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j,k-1}^n}{h_3^2} - T_0 \left(\beta_{11} \frac{u_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i-1,j,k}^{n+1} - u_{i+1,j,k}^{n-1} + u_{i-1,j,k}^{n-1}}{4h_1\tau} + \right. \right. \\ \left. \left. + \beta_{22} \frac{v_{i+1,j+1,k}^{n+1} - v_{i-1,j+1,k}^{n+1} - v_{i+1,j-1,k}^{n-1} + v_{i-1,j-1,k}^{n-1}}{4h_2\tau} + \beta_{33} \frac{w_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k-1}^{n+1} - w_{i,j,k+1}^{n-1} + w_{i,j,k-1}^{n-1}}{4h_3\tau} \right) \right] + T_{i,j,k}^n. \quad (20)$$

$v_{i,j,k}^{(n+1)}$ ва $w_{i,j,k}^{(n+1)}$ лар учун муносабатларни юқорида кўрсатилган каби топиб олишимиз мумкин. Агар вақт бўйича дастлабки икки қатламдаги кўчишлар маълум бўлса, (19)-(20) тенгламалар $(n+1)$ қатламдаги кўчишлар ва температураларни топиш имконини беради. Кўчишларнинг бошланғич ($n=0$, $n=1$) қатламлардаги қийматларини бошланғич ва чегаравий шартлардан топиш мумкин. Навбатдаги $n=2,3,4,\dots$ қатламлардаги кўчишлар ва температуранинг қийматларини (19-20) муносабатлардан топиш мумкин.

Бундан ташқари ошкор бўлмаган чекли-айирмали тенгламалар қуриш мумкин. Бунинг учун асосий ўзгарувчини ўз ичига олган қўшилувчини индекси n ни $n+1$ га алмаштирадик, айирмали схема ошқормас схемага айланади, бунда вақт бўйича тўр қадамларига чекловлар бўлмайди

$$C_{1111} \frac{u_{i+1,j,k}^{n+1} - 2u_{i,j,k}^{n+1} + u_{i-1,j,k}^{n+1}}{h_1^2} + C_{1212} \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{h_2^2} + C_{1313} \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{h_3^2} + \\ + (C_{1122} + C_{1212}) \frac{v_{i+1,j+1,k}^n - v_{i-1,j+1,k}^n - v_{i+1,j-1,k}^n + v_{i-1,j-1,k}^n}{4h_1h_2} + (C_{1133} + C_{1313}) \times \\ \times \frac{w_{i+1,j,k+1}^n - w_{i-1,j,k+1}^n - w_{i+1,j,k-1}^n + w_{i-1,j,k-1}^n}{4h_1h_3} - \beta_{11} \frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i-1,j,k}^n}{2h_1} - f_{i,j,k} = \rho \frac{u_{i,j,k}^{n+1} - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k}^{n-1}}{\tau^2}. \quad (21)$$

(21) чекли-айирмали схемани қуйидаги кўринишга келтирамиз

$$a_i u_{i+1,j,k}^{n+1} + b_i u_{i,j,k}^{n+1} + c_i u_{i-1,j,k}^{n+1} = d_i, \quad (22)$$

бунда

$$a_i = \frac{C_{1111}}{h_1^2}, \quad b_i = -2\left(\frac{C_{1111}}{h_1^2} + \frac{\rho}{\tau^2}\right), \quad c_i = \frac{C_{1111}}{h_1^2} \\ d_i = \rho \frac{-2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k}^{n-1}}{\tau^2} - \left(C_{1212} \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{h_2^2} + C_{1313} \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{h_3^2} + \right. \\ \left. + (C_{1122} + C_{1212}) \frac{v_{i+1,j+1,k}^n - v_{i-1,j+1,k}^n - v_{i+1,j-1,k}^n + v_{i-1,j-1,k}^n}{4h_1h_2} + \right.$$

$$+(C_{1133} + C_{1313}) \frac{w_{i+1,j,k+1}^n - w_{i-1,j,k+1}^n - w_{i+1,j,k-1}^n + w_{i-1,j,k-1}^n}{4h_1h_3} + \beta_{11} \frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i-1,j,k}^n}{2h_1} + f_{1i,j,k}.$$

Юқорида келтирилган усул билан дастлабки икки қатламда изланаётган функциянинг қийматини ҳисоблаймиз, (22) тенгламани $u_i|_{\Sigma_1} = u_i^0$ чегаравий шарт билан хайдаш усули ёрдамида ечилади. u кўчишнинг қийматларини $j, k = \overline{1, N-1}$ нуқталарни ўзгартириш билан бутун ички $(k+1)$ қатлам учун топамиз. Худди шунингдек v ва w кўчишларнинг қийматлари ҳисобланади, T температуранинг қийматларини эса шундай усулда биринчи қатламдан бошлаб ҳисоблаш мумкин. Изланаётган барча функцияларнинг қийматлари ҳисоблангандан кейин пластик соҳалар аниқланади ва ҳисоблаш қайтадан такрорланади.

Учинчи боб «Трансверсал изотроп параллелепипеднинг пластик ва термо-пластик деформацияларини ҳисоблаш» трансверсал изотроп жисмларнинг пластик ва термопластик деформацияланиш жараёнларини ифодаловчи математик моделлар ва алгоритмлар асосида масалаларни сонли ечиш ва асослашга бағишланган. Шу мақсадда, табиий ва термомеханик кучлар таъсирида бўлган трансверсал изотроп параллелепипед учун бир қатор пластик, боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган термопластик масалалар сонли ечилган.

3.1 парagraфда эластик-пластик трансверсал изотроп параллелепипеднинг плиталар билан сиқиш масаласи сонли ечилган. Бу масаланинг математик модели (6-8) нозикли чегаравий масалани қуйидаги чегаравий шартлар асосида ечиш билан ифодаланилади:

$$u_1 = -u^0, u_2 = 0, u_3 = 0; \quad x=l_1 \text{ да}$$

$$u_1 = u^0, u_2 = 0, u_3 = 0; \quad x=0 \text{ да}$$

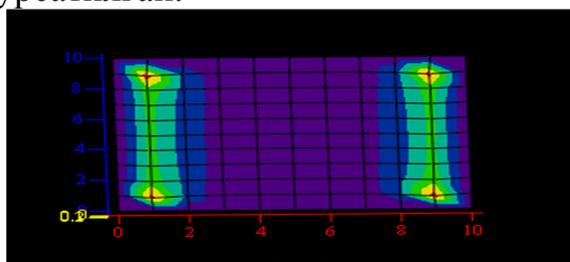
ва бошқа ёқларида

$$u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 0; \quad x_2 = 0, l_2 \text{ да}$$

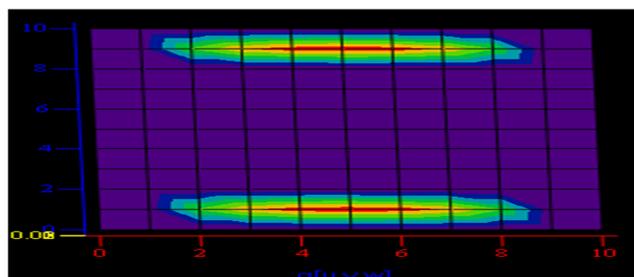
$$u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 0; \quad x_3 = 0, l_3 \text{ да}$$

Сонли ечишда, трансверсал изотроп материал учун эластик ўзгармаслар, уринма модулар ва эластиклик чегаралари қуйидагича олинган: $C_{1122} = 0.21, C_{1133} = 0.19, C_{2233} = 0.19, C_{3333} = 5.35, C_{2323} = 2.39, C_{1313} = 2.39, C_{1212} = 2.735, C_{1111} = 5.68, C_{2222} = 5.68, \lambda_2' = 2.5, \lambda_5' = 2.24, p^* = 0.11, q^* = 0.04, h = 0.1, N = 10.$

Қуйидаги 1-2 расмларда эластик-пластик трансверсал изотроп параллелепипеднинг турли кесимларида пластик зоналарнинг тарқалиши кўрсатилган.



1-расм. XOY текислиги, $z=0.1$
($p \geq p^*$) пластиклик соҳаси



2-расм. ZOY текислиги, $x=0.3$
($q \geq q^*$) пластиклик соҳаси

Чегаравий шартларнинг симметриклигини ҳисобга олган ҳолда 1-2 расмдаги пластик соҳалар тақсимланишининг симметриклиги, эластик-пластик трансверсал изотроп жисмлар учун чегаравий масалани ечиш учун таклиф қилинган итерацион усул ва сонли натижаларнинг тўғрилиги таъминлайди.

Сонли натижалар $\varepsilon = 0.0001$ аниқликда ҳисобланган ва бу аниқликка эришиш учун 46 итерация амалга оширилди.

3.2 параграфда (6-8) эластик-пластик трансверсал изотроп параллелепипеднинг текис тақсимланган кучлар таъсиридаги мувозанати масаласи сонли ечилган. Фараз қилайлик параллелепипед OX_1 ўқиға перпендикуляр ёқлари бўйича текис таъсир этувчи кучлар ёрдамида сиқилсин ва бошқа ёқлари кучланишдан холи бўлсин, яъни:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{x_1=0} = s_1, \quad \sigma_{11}|_{x_1=l_1} = -s_1, \quad \sigma_{21}|_{x_1=0, l_1} = 0, \quad \sigma_{31}|_{x_1=0, l_1} = 0, \\ \sigma_{22}|_{x_2=0, l_2} = 0, \quad \sigma_{21}|_{x_2=0, l_2} = 0, \quad \sigma_{23}|_{x_2=0, l_2} = 0, \\ \sigma_{33}|_{x_3=0, l_3} = 0, \quad \sigma_{13}|_{x_3=0, l_3} = 0, \quad \sigma_{23}|_{x_3=0, l_3} = 0, \end{aligned}$$

Масалани ечиш учун дастлабки маълумотлар аввалги масаладаги каби олинган, фақат қуйидагилар билан фарқ қилади: $p^* = 0.1$, $q^* = 0.1$, $\lambda_2' = 1.6$, $\lambda_5' = 0.7$, $l_i = 1$, $i = \overline{1,3}$

1-жадвал.

Хар хил усуллар билан олинган кўчишларнинг қийматлари

Трансверсал изотроп жисм учун пластиклик назарияси (ПН)	u(3,3,3)	v(3,2,1)	w(3,5,4)
Юкланиш сирти деформациялар фазосида бўлган (ПН)	0,046495	-0,005916	-0,00076
Юкланиш сирти кучланишлар фазосида бўлган (ПН)	0,04925	-0,006055	-0,00076
Таклиф этилган усул	0,0479	-0,00805	-0,000755

1-жадвалда трансверсал изотроп жисмнинг деформацион назария асосида олинган сонли натижалари, А.А.Халджигитов томонидан бошқа усуллар ва назариялар ёрдамида олинган натижалари билан солиштирилган. Сонли натижаларнинг бир-бирига яқинлиги таклиф қилинаётган чекли-айирмали итерацион усулнинг тўғрилигини кўрсатади.

3.3 параграфда OX_1 ўқиға перпендикуляр ёқларға қўйилган куббасимон кўринишдаги ташқи куч остида сиқилаётган трансверсал изотроп параллелепипеднинг пластик деформацияланиши тадқиқ қилинган.

$$S = \pm(1 - \cos 2\pi x_2)(1 - \cos 2\pi x_3), \quad x_i = 0, l_i.$$

Параллелепипеднинг бошқа ёқлари юкланишлардан холи. Масалани ечиш учун дастлабки маълумотлар аввалги масаладаги каби олинган, фақат қуйидагилар билан фарқ қилади: $p^* = 0.1$, $q^* = 0.001$, $\varepsilon = 0.0001$.

Қуйидаги 2-жадвалда кучланиш тензори σ_{11} нинг, куббасимон кўринишдаги куч қўйилган параллелепипеднинг ёқларидаги ҳисобланган қийматлар тақсимоти келтирилган. Эътибор қилинса, кучланиш тензори қийматлари симметрик ва чегаравий шартларға мос равишда, кучланишнинг

Энг катта қийматига ёқларнинг ўртасида $\sigma_{11} = S = 4$ қийматга эришишини ва ёқнинг қирраларида нолга тенг эканлигини кўриш мумкин.

2-жадвал.

$x=0$ да кучланиш тензори компонентаси σ_{11} нинг тақсимланиши

	z=0	z=0.1	z=0.2	z=0.3	z=0.4	z=0.5	z=0.6	z=0.7	z=0.8	z=0.9	z=1
y=0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y=0.1	0	0,0365	0,132	0,25	0,3455	0,382	0,3455	0,25	0,132	0,0365	0
y=0.2	0	0,132	0,4775	0,9045	1,25	1,382	1,25	0,9045	0,4775	0,132	0
y=0.3	0	0,25	0,9045	1,7135	2,368	2,618	2,368	1,7135	0,9045	0,25	0
y=0.4	0	0,3455	1,25	2,368	3,2725	3,618	3,2725	2,368	1,25	0,3455	0
y=0.5	0	0,382	1,382	2,618	3,618	4	3,618	2,618	1,382	0,382	0
y=0.6	0	0,3455	1,25	2,368	3,2725	3,618	3,2725	2,368	1,25	0,3455	0
y=0.7	0	0,25	0,9045	1,7135	2,368	2,618	2,368	1,7135	0,9045	0,25	0
y=0.8	0	0,132	0,4775	0,9045	1,25	1,382	1,25	0,9045	0,4775	0,132	0
y=0.9	0	0,0365	0,132	0,25	0,3455	0,382	0,3455	0,25	0,132	0,0365	0
y=1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3-жадвалда, параллелепипеднинг баъзи нуқталарида, хар хил усуллар билан ҳисобланилган кўчиш вектори компоненталарининг қийматлари солиштирилган. Эътироф қилинган натижалар билан таққослаш натижаларининг етарли даражада яқинлиги, татбиқ қилинаётган чекли-айирмали итерацион усулнинг эффективлигини кўрсатади.

3-жадвал.

Параллелепипеднинг баъзи нуқталаридаги кўчиш векторларининг қийматлари

Итерацион усуллар	u(3.4.3)	v(3.2.1)	w(3.5.4.)
Эластик ечимлар усули	4.79-02	-8.03-03	-7.55-04
Икки кадамли усул	4.80-02	-8.19-03	-7.56-04
Таклиф этилган усул	4.55-02	-8.09-03	-7.36-04

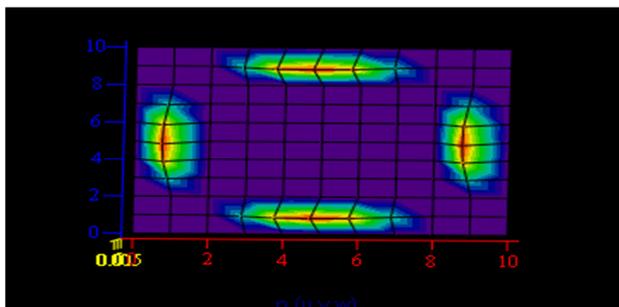
3.4 параграфда, қуйидаги қонуният билан берилган ички температуравий майдон таъсирида бўлган ва барча ёқлари бўйича маҳкамланган трансверсал изотроп параллелепипед ҳақидаги термопластик чегаравий (15-17) масала қаралган

$$T(x_1, x_2, x_3) = T_0 \sin \frac{\pi x_1}{l_1} \sin \frac{\pi x_2}{l_2} \sin \frac{\pi x_3}{l_3}.$$

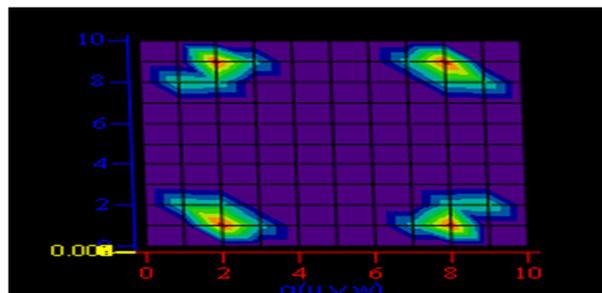
Дастлабки маълумотлар аввалги масаладаги каби олинган, фақат қуйидагилар билан фарқ қилади:

$$\lambda'_2 = 2.5, \lambda'_3 = 2.24, \beta_{11} = 0.25, \beta_{22} = 0.25, \beta_{33} = 0.37, p^* = 0.14, q^* = 0.11, T_0 = 20.$$

Қуйида 3-4 расмларда, қаралаётган трансверсал изотроп параллелепипеднинг XOY текислигида $z=0.7$ бўлгандаги кесимда пластик зоналарнинг тақсимланиши кўрсатилган.



**3-расм. XOY текислиги, $z=0.7$
($p \geq p^*$) даги пластик соҳалар**



**4-расм. XOY текислиги, $z=0.7$
($q \geq q^*$) даги пластик соҳалар**

Қўйилган чегаравий шартларнинг симметриклигига мос равишда, (7-8) жадваллар ва (3-4) расмларда келтирилган сонли натижаларнинг ҳам қаралаётган параллелепипедда симметрик тақсимланганлиги, сонли ечиш натижаларининг тўғрилигини ва тақлиф этилган итерацион усулнинг трансверсал изотроп жисм учун термопластик масалаларни ечишдаги самарадорлигини таъминлайди.

3.5 параграфда трансверсал изотроп параллелепипед учун боғлиқ динамик термопластик чегаравий (9-14) масала сонли ечилган. Модел масалани сонли ечишда қуйидаги бошланғич шартлар

$$u(x, y, z, t)|_{t=0} = 0, \quad v(x, y, z, t)|_{t=0} = 0, \quad w(x, y, z, t)|_{t=0} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial t}|_{t=0} = 0,$$

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0 \sin(\pi x) \sin(\pi y) \sin(\pi z),$$

ва чегаравий шартлар берилган

$$u(x, y, z, t)|_{\Sigma} = 0, \quad v(x, y, z, t)|_{\Sigma} = 0,$$

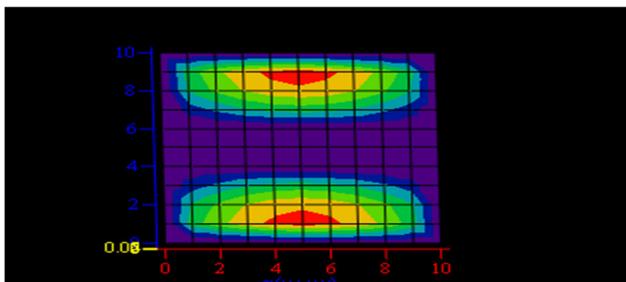
$$w(x, y, z, t)|_{\Sigma} = 0, \quad T(x, y, z, t)|_{\Sigma} = 0.$$

Дастлабки маълумотлар аввалги масаладаги каби олинган, фақат қуйидагилар билан фарқ қилади:

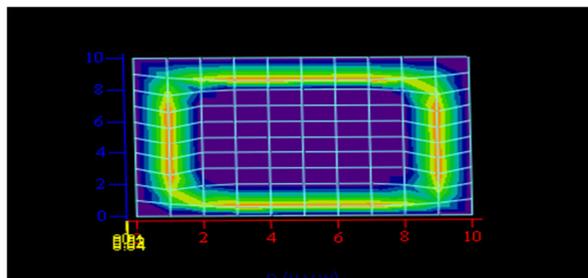
$$b_{11}=0.25, \quad b_{22}=b_{11}, \quad b_{33}=0.37, \quad \lambda_{11}=0.03, \quad \lambda_{22}=0.03, \quad \lambda_{33}=0.01, \quad \lambda_2' = 2.5, \quad \lambda_5' = 2.24, \quad \rho=0.81,$$

$$c_\varepsilon=3.5, \quad \lambda_2' = 2.5, \quad \lambda_5' = 2.24, \quad \tau=0.01, \quad h=0.1 \quad p^* = 0.08, \quad q^* = 0.04, \quad T_0 = 20, \quad N_1 = N_2 = N_3 = 10.$$

Қуйида, трансверсал изотроп параллелепипеднинг вақт бўйича турли хил қатламлари ва кесимларида пластик зоналарнинг тақсимланиши келтирилган.



**5-расм. XOY текислигида $z=0.8$,
 $t=0.07$, $q \geq q^*$ ($q^*=0.04$) бўлганда
пластик соҳалар**



**6-расм. XOY текислигида $z=0.7$,
 $t=0.07$, $p \geq p^*$ ($p^*=0.08$) бўлганда
пластик соҳалар**

Эслатиб ўтамиз, қаралаётган трансверсал изотроп жисм учун айланиш ўқи OZ ҳисобланади. Бошланғич ва чегаравий шартлар симметрик берилган, $u(x,y,z)$ ва $v(x,y,z)$ кўчишларнинг симметрик эканлигини кўриш мумкин, аммо $w(x,y,z)$ кўчишларнинг бошқаларидан фарқли эканлигини ҳам кўриниб турибти, бу анизотроплик ҳолатининг трансверсал изотроп параллелепипеднинг эластик-пластик ҳолатига таъсирини ифодалайди.

3.6. параграфда «Анизотроп жисмлар учун эластиклик ва термоэластиклик назарияларининг ночизикли масалаларини сонли ечиш дастурий мажмуаси» Delphi7 муҳитида OpenGL билан интеграция қилинган дастурий восита инструкцияси келтирилган.

Ушбу дастурий восита қуйидаги ночизикли масалаларини сонли ечиш учун мўлжалланган:

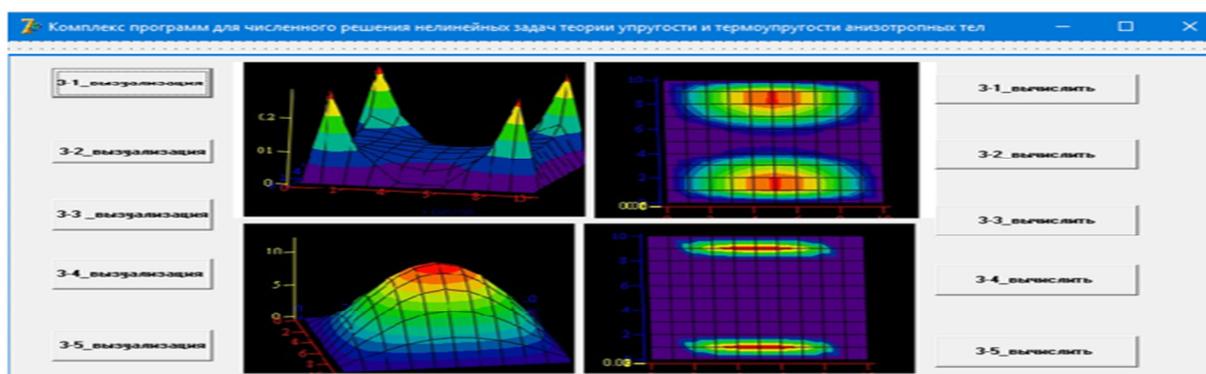
пластик трансверсал изотроп параллелепипеднинг плиталар билан сиқиш масаласини сонли ечиш;

пластик трансверсал изотроп параллелепипеднинг текис тақсимланган кучлар таъсиридаги мувозанат масаласи сонли ечиш;

куббасимон кўринишдаги ташқи куч остида сиқилаётган трансверсал изотроп параллелепипеднинг пластик деформацияланиши сонли ечиш;

трансверсал изотроп параллелепипеднинг термопластик деформациясини сонли ечиш;

трансверсал изотроп параллелепипед учун боғлиқ динамик термопластик масалани сонли ечиш.



7-расм. Дастурнинг асосий ойнаси

Дастурни ишга туширганда қуйидаги асосий форма (7-расм) пайдо бўлади ва юқорида келтирилган масалалар рўйхатдан танланади.

Ушбу дастурий воситадан композицион материаллардан ташкил топган конструкциялар ва улар элементларининг турли иссиқлик ва механик кучлар таъсиридаги мустаҳкамлик захираларини ҳисоблашда фойдаланиш мумкин.

ХУЛОСА

«Анизотроп жисмларнинг нозизиқли деформацияланиш жараёнини сонли моделлаштириш» мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар асосида қуйидаги натижалар олинган:

1. Трансверсал изотроп жисмлар учун деформацион назарияга асосланган пластик ва термопластик масалаларни ифодаловчи модел тенгламалар ишлаб чиқилди. Модел тенгламалар боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган чегаравий масалалар кўринишида қурилди.

2. Турли хил чегаравий шартлар асосида трансверсал изотроп жисмлар учун пластик ва термопластик масалаларнинг сонли моделлари ишлаб чиқилган.

3. Трансверсал изотроп жисм учун уч ўлчовли эластопластик ва термопластик чегаравий масалаларни сонли ечиш учун янгича ёндашув таклиф қилинган ва асосланган.

4. Пластик, термопластик боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган чегаравий масалаларни сонли ечиш, анизотроп жисмларнинг термомеханик кучлар таъсири остидаги кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилиш имконини берувчи ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалар ишлаб чиқарилган.

5. Турли хил чегаравий шартларда трансверсал изотроп параллелепипед учун эластопластик, боғлиқ ва боғлиқ бўлмаган термопластик чегаравий масалалар сонли ечилган.

6. Ишлаб чиқилган сонли алгоритмлар ва дастурий воситалар Хоразм вилояти Боғот туманидаги «Архитектура ва қурилиш бўлими», «Шохназар ва Ғайрат Ибодуллаевлар» хусусий корхонаси шунингдек Самарканд вилояти Жомбой туманидаги «DAMIR QURILISH SERVIS» МЧЖ объектларида татбиқ қилинган. Дастурий воситадан фойдаланиш иш унумдорлигини 8-10% га ошишига, сарф-харажатларнинг 7-10% га камайишига имконият берган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**НАУЧНО-ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННО-
КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

БАБАЖАНОВ МУМИН РАЖАБОВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕЛИНЕЙНОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ ТЕЛ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2019.4.PhD/T1428.

Диссертация выполнена в Научно-инновационном центре информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.tuit.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Халджигитов Абдували Абдисаматович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Назирова Элмира Шодмоновна**
доктор технических наук, доцент

Исомиддинов Анвар Иномжонович
доктор философии по техническим наукам

Ведущая организация: **Ташкентский государственный транспортный университет**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в __ часов на заседании научного совета DSc.13/30.12.2019.T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий. (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Ташкентский университет информационных технологий. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер № ____). (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2021 года.
(протокол рассылки № ____ от «__» _____ 2021 года.)

Р.Х. Хамдамов
Председатель научного совета по
присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор

Ф.М. Нуралиев
Ученый секретарь научного совета по
присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, доцент

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время численное моделирование процесса нелинейного деформирования анизотропных тел на основе современных информационных технологий играет важную роль в исследованиях композиционных материалов обладающих чётко выраженными анизотропными свойствами. Математическое и численное моделирования на базе современных информационных технологий обусловленных при исследовании широко применяется в новых волокнистых и слоистых композитов в строительстве, машиностроении, авиастроении, медицине, текстильной промышленности, и в других областях. Математические модели и проблемы разработки алгоритмов для расчета нелинейных деформаций анизотропных тел, актуальны в таких промышленно развитых странах, как США, Канада, Великобритания, страны Европейского Союза, Российская Федерация, Япония, Индия, Китай, Южная Корея, Индонезия и Малазия.

Мировой рынок композитов будет увеличиться более чем на 8% в год - с 72,58 млрд USD в 2016 году до 115,43 млрд USD к 2022, сообщает РБК со ссылкой на прогноз Markets and Markets. По данным Umatex, дочерней структуры Росатома, более 30% мирового объема производства полимерных композитов, или около 4 млн. тонн, используется в строительстве жилых и промышленных зданий, автодорог и мостов, коммунальной инфраструктуры. Композитные материалы, такие как армированные бетонные плиты, углепластики и стеклопластики, применяются в строительстве давно и широко, однако новые материалы открывают массу возможностей для улучшения теплоизоляции и энерго-эффективности, уменьшения веса зданий и повышения сейсмостойчивости, а также создания сложных архитектурных форм. Замена металлической арматуры на композитную, способна значительно увеличить срок службы, а армированные сетки могут радикально продлить жизнь дорожному покрытию².

В мире проводятся целевые исследования по численному моделированию процесса нелинейного деформирования анизотропных тел. Прежде чем производить новые материалы, необходимо детально изучить напряженно-деформированное состояние тела, определить запас прочности и надежности несущих элементов конструкций и их элементов из композиционных материалов. Появления многопроцессорных компьютеров и современных вычислительных методов обусловили возрастающую роль численного моделирования в решении фундаментальных научных и прикладных задач. Для получения наилучших экономических показателей, необходимо стремиться к разработке и усовершенствованию моделей и алгоритмов для расчета процесса нелинейного деформирования анизотропных тел.

Начиная с первых лет независимости Республики Узбекистан, ведется интенсивная работа по локализации строительных, текстильных и

²http://www.mrcplast.ru/news-news_open-336238.html

композиционных материалов. За счет ввода новых композиционных материалов в строительстве, машиностроении и других отраслях народного хозяйства в несколько раз увеличилось качество и объём производства. Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах, в том числе в Указах Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», №УП-5099 от 30 июня 2017 года «О мерах по коренному улучшению условий для развития отрасли информационных технологий в республике», в Постановлении Президента Республики Узбекистан №-ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», а также другим нормативно-правовым документам, принятым в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Математика, механика и информатика»

Степень изученности проблемы. Построение математических моделей описывающих процесс нелинейного деформирования анизотропных тел является фундаментальной проблемой математического моделирования и теории пластичности. Эти вопросы исследованы в классических работах известных ученых, как Сен-Венана, Г.Генки, В.Геогджаева, Р.Друккера, А.Ильюшина, П.М.Нахди, Л.М.Качанова и др. Развитие исследований в области математического моделирования процесса нелинейного деформирования анизотропных тел, обусловлено с широким спросом на композиционные материалы. Различают естественные (кристаллы, графит, горные породы, бревно) и искусственные (железобетон, углепластик, стеклопластик) композиционные материалы. Среди искусственных композитов наиболее востребованными являются слоистые и волокнистые композиты.

Среди известных специалистов в области композитных материалов можно отметить следующих авторов, таких как Дж.Абоуди, В.А.Ломакин, Р.Хилл, Б.Е.Победря, И.Н.Гольденблат, С.Шешенин, А.Солодовников и др. В последние годы к математическому моделированию пластических деформаций твердых тел с учетом температуры в виде связанных и несвязанных краевых задач посвящены работы В.Новацкого, Н.М.Youssef, Sloderbach Z., Rajak J., Abbas I.A. и др. Математическим моделированием и методами решения задач термо-упруго-пластичности в Узбекистане занимались такие авторы как В.Кабулов, Т.Буриев, Б.Курманбаев, А.Ахмедов, А.Халджигитов, Р.Абиров, А.Полатов и др.

Обзор и анализ литературы показывает, что численное моделирование и решение краевых задач термоупругопластичности для анизотропных тел и их программные средства недостаточно изученные и является актуальной задачей.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ в рамках проектов: №Ф4-014 «Связанные задачи термопластичности и термовязкопластичности для анизотропных тел» (2012-2016), №А5-031 «Разработка программного комплекса для автоматизации проектирования и анализа технических конструкций» (2012-2014) в Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада Аль-Хорезми.

Целью исследования является разработка математических моделей, численных алгоритмов и программных средств для расчета процесса нелинейного деформирования анизотропных тел.

Задачи исследования:

разработка модельных уравнений пластических и термопластических деформаций трансверсально изотропных тел на основе деформационной теории;

построение сеточных уравнений для решения статических, динамических, связанных и несвязанных задач термоупругопластичности;

разработка эффективного численного метода решения статических и динамических задач термоупругопластичности для анизотропных тел;

разработка вычислительных алгоритмов и программных средств для численного решения пластических, термопластических связанных и несвязанных краевых задач, позволяющих исследовать напряженно-деформированное состояние анизотропных тел под воздействием механических и температурных сил.

Объектом исследования являются процессы динамического деформирования конструкций из термоупругопластических трансверсально изотропных материалов.

Предметом исследования являются численное моделирование процесса нелинейного деформирования анизотропных тел сформулированных в виде статических, динамических, связанных и несвязанных краевых задач теории термоупругопластичности.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использованы общие законы механики деформирования твёрдого тела, методы математического моделирования, численные методы, явные и неявные разностные схемы, итерационные методы решения разностных уравнений, технологии модульного и структурного программирования, вычислительные эксперименты, а также компьютерные технологии визуализации результатов расчета.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны математические модели пластических и термопластических процессов деформации для трансверсально изотропных тел (композиционных материалов) на основе деформационной теории при учёте механических и температурных начальных и краевых условиях;

построены эффективные конечно-разностные уравнения для решения модельных уравнений процессов нелинейной деформации анизотропных тел при учёте термомеханических сил;

разработаны явные и неявные сеточные уравнения при учёте численного метода решения статических и динамических задач термоупругопластичности для анизотропных тел;

разработаны вычислительные алгоритмы и структуры программных средств для численного решения пластических и термопластических связанных и несвязанных краевых задач напряженно-деформированное состояние анизотропных тел, учитывая механические и температурные силы.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан алгоритм и программное средство для расчета упругопластического деформирования трансверсально изотропных тел;

с помощью разработанного программного средства определены запасы прочности и надёжности конструкций и их элементов из трансверсально изотропных материалов под действием статических и динамических термомеханических сил.

Достоверность результатов исследования обоснована строгостью математических рассуждений, строгим соблюдением законов термодинамики, численным решением краевых задач пластичности и термопластичности и сравнением с точным решением, а также проведением вычислительных экспериментов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в том, что предложенные численные методы могут быть использованы не только при численном решении краевых задач упругопластичности и термопластичности, но и при решении других задач математического моделирования и механики сплошных сред.

Практическая значимость результатов исследований определяется тем, что предложенный численный метод решения краевых задач упругопластичности и термопластичности и полученные результаты могут быть использованы при численном моделировании и определении запасов прочности и надёжности современных технических объектов и сооружений из анизотропных материалов находящихся под действием термомеханических сил.

Внедрение результатов исследования. Математические модели, численные алгоритмы и программные средства, разработанные для исследования процесса нелинейного деформирования анизотропных тел:

разработанные вычислительные алгоритмы и программные средства для численного решения пластических и термопластических связанных и несвязанных краевых задач, позволяющие исследовать напряженно-деформированное состояние анизотропных тел, под воздействием механических и температурных сил, внедрена в объекты «Управление архитектуры и строительства» Багатского района Хорезмской области (Министерство по развитию информационных технологий и коммуникаций,

справка №33-8/9024 от 23.12.2019 г., Министерство Строительства, справка №10159/09-07 от 23.12.2019 г.). В результате обеспечена возможность повысить производительность работы на 8-10% и снизить затраты на 7-10%;

разработанные численные алгоритмы и программное средство для оценки влияния распределения напряжений, температуры и анизотропии на напряжённо–деформированное состояние и появления зон пластичности в трансверсально изотропных телах внедрены в объекты ООО «DAMIR QURILISH SERVIS» Джамбайского района Самаркандской области (Министерство Строительства, справка №10159/09-07 от 23.12.2019 г., Министерство по развитию информационных технологий и коммуникаций, справка №33-8/9024 от 23.12.2019 г.). В результате обеспечена возможность повысить производительность работы на 10-15% и снизить затраты на 10-15%.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы обсуждены на 8 международных и 3 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 25 научных работ, из них 10 журнальных статей, в том числе 3 в международных и 7 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, также получены 2 свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных литератур, условных обозначений и терминов и приложений. Объем диссертации составляет 101 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в практику и сведения об опубликованных работах и о структуре диссертации.

В первой главе диссертации, названной «**Математические модели пластических деформаций анизотропных тел**» приведены необходимые предварительные сведения, основные определения, определяющие соотношения, математические модели линейного и нелинейного деформирования анизотропных тел.

В параграфе 1.1 сформулированы математические модели процесса линейного и нелинейного деформирования анизотропных тел. Краевая задача теории упругости состоящая из уравнений равновесия в перемещениях с соответствующими краевыми условиями:

$$\sum_{j,k,l=1}^3 C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l \partial x_j} + X_i = 0, \quad x_i \in V, \quad (1)$$

$$u_i|_{\Sigma_1} = u_i^o, \quad x_i \in \Sigma_1, \quad (2)$$

$$\sum_{k,l,j=1}^3 C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} n_j \Big|_{\Sigma_2} = S_i^0, \quad x_i \in \Sigma_2, \quad (3)$$

где, u_i - компоненты вектора перемещений, X_i , S_i - объёмные и поверхностные силы, Σ_1 , Σ_2 - части поверхности Σ объёма V , n_j - внешняя нормаль к поверхности Σ_2 объёма V , C_{ijkl} - тензор упругих констант, обладающий следующими свойствами симметрии и положительной определённости

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{klij}, \quad C_{ijkl} a_{ij} a_{kl} \geq 0, \quad a_{ij} = a_{ji}. \quad (4)$$

При выполнении условий симметрии (4) тензор C_{ijkl} имеет 9 независимых упругих постоянных, и характеризует ортотропный материал, если тензор удовлетворяет дополнительно еще следующие условия симметрии

$$C_{1133} = C_{2233}, \quad C_{2323} = C_{1313}, \quad C_{1212} = \frac{1}{2}(C_{1111} - C_{2211}),$$

тогда, количество независимых постоянных тензора уменьшается до 5, и соответствует трансверсально изотропному материалу. Заменяя определяющее соотношения между тензорами напряжений и деформаций в задаче (1-3) на

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - \sigma_{ij}^p, \quad (5)$$

где σ_{ij}^p - нелинейная часть тензора напряжений, будем иметь математическую модель нелинейной деформации для анизотропных тел.

В параграфе 1.2 сформулирована нелинейная краевая задача для трансверсально изотропных тел, которая представлена в следующем виде

$$\sum_{j,k,l=1}^3 C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} + X_i = f_i, \quad (6)$$

$$u_i|_{\Sigma_1} = u_i^o, \quad x_i \in \Sigma_1, \quad (7)$$

$$\sum_{k,l,j=1}^3 C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} n_j \Big|_{\Sigma_2} = S_i + \varphi_i, \quad x_i \in \Sigma_2, \quad (8)$$

где f_i и φ_i определены соотношениями

$$f_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}^p}{\partial x_j} \text{ при } p \geq p^*, q \geq q^*, \quad \varphi_i = \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij}^p n_j \Big|_{\Sigma_2} \text{ при } p \geq p^*, q \geq q^*$$

и выражают нелинейные части уравнения (6) и краевых условия (8). При нулевых значениях этих функций, из краевой задачи (6-8) следует линейная краевая задача теории упругости (1-3).

Заметим, что в соотношении (5) величина σ_{ij}^p - представляет собой нелинейную часть модельного уравнения теории пластичности трансверсально изотропных тел, т.е.

$$\sigma_{ij}^p = \begin{cases} 0, & \text{при } p < 0 \text{ и } q < 0, \\ 2(\lambda_2 - \lambda_2')(1 - \frac{p^*}{p})p_{ij}, & \text{при } p \geq p^*, \\ 2(\lambda_5 - \lambda_5')(1 - \frac{q^*}{q})q_{ij}, & \text{при } q \geq q^*, \end{cases}$$

где p^*, q^* - пределы упругости в продольном и поперечном направлениях трансверсально изотропного тела соответственно,

$$p_{ij} = \varepsilon_{ij} + \frac{\tilde{\theta}}{2}(\delta_{i3}\delta_{j3} - \delta_{ij}) + \varepsilon_{33}\delta_{i3}\delta_{j3} - (\varepsilon_{i3}\delta_{j3} + \varepsilon_{3j}\delta_{i3}),$$

$$q_{ij} = \varepsilon_{i3}\delta_{j3} + \varepsilon_{3j}\delta_{i3} - 2\varepsilon_{33}\delta_{i3}\delta_{j3}, \quad \tilde{\theta} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}.$$

Упругие постоянные $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ связаны с компонентами тензора упругих постоянных следующим образом

$$\lambda_1 = C_{2211}, \lambda_2 = C_{1212}, \lambda_3 = C_{1133}, \lambda_4 = C_{3333}, \lambda_5 = C_{1313},$$

$$\lambda_6 = \lambda_7 = \lambda_1 + 2\lambda_2 = C_{2211} + 2C_{1212}, \lambda_8 = \lambda_3 = C_{1133}, \lambda_9 = \lambda_5 = C_{1313}.$$

В параграфе 1.3 сформулирована краевая задача термопластичности для трансверсально изотропных тел, состоящая из уравнения движения

$$\sum_{j=1}^3 \sigma_{ij,j} + X_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (9)$$

уравнения состояния термопластических деформаций

$$\sigma_{ij} = C_{ijke}\varepsilon_{kl} - \beta_{ij}(T - T_0)\delta_{ij} - 2(\lambda_2 - \lambda_2')(1 - \frac{p^*}{p})p_{ij} - 2(\lambda_5 - \lambda_5')(1 - \frac{q^*}{q})q_{ij} \quad (10)$$

при $p \geq p^*, q^* \geq q,$

соотношения Коши

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2}(u_{k,l} + u_{l,k}), \quad (11)$$

уравнения притока тепла для анизотропных тел

$$\lambda_{ij}T_{,ij} - c_\varepsilon \dot{T} - T \cdot \beta_{ij} \cdot \dot{\varepsilon}_{ij} = 0, \quad (12)$$

с начальными

$$u_i|_{t=t_0} = \varphi_i, \quad \dot{u}_i|_{t=t_0} = \psi_i, \quad T|_{t=t_0} = T_0, \quad (13)$$

и краевыми условиями

$$u_i|_{\Sigma_1} = u_i^0, \quad T|_{\Sigma} = \bar{T}_0, \quad \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij}n_j|_{\Sigma_2} = S_i^0. \quad (14)$$

где $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – тензор напряжений и деформаций, ρ – плотность, T – температура, c_ε – теплоемкость при постоянной деформации, β_{ij} – тензор теплового расширения, λ_{ij} – коэффициенты теплопроводности, δ_{ij} – символ Кронекера.

Вторая глава названная «**Численные модели и методы решения пластических задач для анизотропных тел**» посвящена построению дискретных аналогов краевых задач термоупругопластичности. Разработаны эффективные численные алгоритмы решения полученных конечно-разностных уравнений.

В параграфе 2.1 построены конечно-разностные уравнения для нелинейной краевой задачи деформационной теории трансверсально изотропных тел. При этом, дифференциальные уравнения (6) рассмотрены в параллелепипеде находящимся в декартовой системе координат OX_i . Для построения конечно разностных уравнений, ребра параллелепипеда длиной l_i разделены на N_i частей с шагом $h_i = l_i / N_i$ между узлами $x_i = kh_i$, $k = 0, N_i$, $i = 1, 2, 3$. В результате, заменяя производные в уравнениях (6) соответствующими конечно-разностными соотношениями и разрешая полученные конечно-разностные уравнения относительно центральных узловых точек функций $u_{i,j,k}$, $v_{i,j,k}$ и $w_{i,j,k}$ организуем следующий итерационный процесс:

$$\begin{aligned} u_{i,j,k}^{(n+1)} = & \left[\frac{C_{1111}}{h_1^2} (u_{i+1,j,k}^{(n)} - u_{i-1,j,k}^{(n)}) + \frac{C_{1212}}{h_2^2} (u_{i,j+1,k}^{(n)} + u_{i,j-1,k}^{(n)}) + \frac{C_{1313}}{h_3^2} (u_{i,j,k-1}^{(n)} + u_{i,j,k+1}^{(n)}) + \right. \\ & + \frac{C_{1122} + C_{1212}}{4h_1h_2} (v_{i+1,j+1,k}^{(n)} - v_{i+1,j-1,k}^{(n)} - v_{i-1,j+1,k}^{(n)} + v_{i-1,j-1,k}^{(n)}) + \frac{C_{1133} + C_{1313}}{4h_1h_3} \times \\ & \left. \times (w_{i+1,j,k+1}^{(n)} - w_{i+1,j,k-1}^{(n)} - w_{i-1,j,k+1}^{(n)} + w_{i-1,j,k-1}^{(n)}) - f_{i,j,k} \right] / \left(\frac{2C_{1111}}{h_1^2} + \frac{2C_{1212}}{h_2^2} + \frac{2C_{1313}}{h_3^2} \right). \end{aligned}$$

Выше указанным образом можно найти соотношения для $v_{i,j,k}^{(n+1)}$ и $w_{i,j,k}^{(n+1)}$.

С учетом краевых условий значения искомой функции во внутренних узловых точках в нулевом приближении итерации считаются тривиальными. Напомним, что слагаемые $f_{1,i,j,k}$, $f_{2,i,j,k}$, $f_{3,i,j,k}$ вычисляются при выполнении условий перехода предела упругости $p \geq p^*$, $q \geq q^*$. Порядок аппроксимации разностной схемы $O(h_1^2, h_2^2, h_3^2)$.

В параграфе 2.2 построены конечно-разностные уравнения и численный алгоритм решения несвязанных термопластических краевых задач для трансверсально изотропных тел. В несвязанном случае краевая задача термопластичности принимает следующий вид

$$\begin{aligned} C_{1111} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + C_{1212} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + C_{1313} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (C_{1122} + C_{1212}) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + (C_{1133} + C_{1313}) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} - \beta_{11} \frac{\partial T}{\partial x} - f_1 &= 0, \\ C_{1212} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + C_{2222} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + C_{2323} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + (C_{2211} + C_{1212}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + (C_{2233} + C_{2323}) \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} - \beta_{22} \frac{\partial T}{\partial y} - f_2 &= 0, \\ C_{1313} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + C_{2323} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + C_{3333} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + (C_{3311} + C_{1313}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + (C_{3322} + C_{2323}) \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} - \beta_{33} \frac{\partial T}{\partial z} - f_3 &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

и, пусть краевые условия имеют вид (параллелепипед зашпелён по всем граням), т.е.

$$\begin{aligned} u|_{0,l_1} &= 0, & v|_{0,l_1} &= 0, & w|_{0,l_1} &= 0, \\ u|_{0,l_2} &= 0, & v|_{0,l_2} &= 0, & w|_{0,l_2} &= 0, \\ u|_{0,l_3} &= 0, & v|_{0,l_3} &= 0, & w|_{0,l_3} &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Температурное поле внутри параллелепипеда распределено по следующей закономерности

$$T(x, y, z) = T_0 \sin\left(\frac{\pi x}{l_1}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{l_2}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{l_3}\right). \quad (17)$$

где $\beta_{11} = \beta_{22}, \beta_{33}$ - коэффициенты теплового расширения трансверсального изотропного тела.

Заменяя производные в уравнениях (15) соответствующими конечно-разностными соотношениями и разрешая полученные конечно-разностные уравнения относительно узловых функций $u_{i,j,k}, v_{i,j,k}$ и $w_{i,j,k}$ организуем следующий итерационный процесс:

$$u_{i,j,k}^{(n+1)} = \left[\frac{C_{1111}}{h_1^2} (u_{i+1,j,k}^{(n)} - u_{i-1,j,k}^{(n)}) + \frac{C_{1212}}{h_2^2} (u_{i,j+1,k}^{(n)} + u_{i,j-1,k}^{(n)}) + \frac{C_{1313}}{h_3^2} (u_{i,j,k+1}^{(n)} + u_{i,j,k-1}^{(n)}) + \frac{C_{1122} + C_{1212}}{4h_1h_2} (v_{i+1,j+1,k}^{(n)} - v_{i+1,j-1,k}^{(n)} - v_{i-1,j+1,k}^{(n)} + v_{i-1,j-1,k}^{(n)}) + \frac{C_{1133} + C_{1313}}{4h_1h_3} (w_{i+1,j,k+1}^{(n)} - w_{i+1,j,k-1}^{(n)} - w_{i-1,j,k+1}^{(n)} + w_{i-1,j,k-1}^{(n)}) - \frac{\beta_{11}}{h_1} (T_{i+1,j,k}^{(n)} - T_{i,j,k}^{(n)}) - f_{i,j,k} \right] / \left(\frac{2C_{1111}}{h_1^2} + \frac{2C_{1212}}{h_2^2} + \frac{2C_{1313}}{h_3^2} \right).$$

Выше указанным образом можно найти соотношения для $v_{i,j,k}^{(n+1)}$ и $w_{i,j,k}^{(n+1)}$.

В параграфе 2.3 построены конечно-разностные уравнения и численный алгоритм решения связанных термопластических краевых задач для трансверсально изотропных тел. Рассмотрим связанную динамическую термопластическую краевую задачу (9-14) для трансверсально изотропного параллелепипеда с соответствующими начальными

$$\begin{aligned} u(x,y,z,t)|_{t=0} &= u^0, \quad v(x,y,z,t)|_{t=0} = v^0, \quad w(x,y,z,t)|_{t=0} = w^0, \\ \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} &= \varphi_1, \quad \frac{\partial v}{\partial t}|_{t=0} = \varphi_2, \quad \frac{\partial w}{\partial t}|_{t=0} = \varphi_3, \quad T(x,y,z,t)|_{t=0} = T_0. \end{aligned} \quad (18)$$

и краевыми условиями

$$\begin{aligned} u(x,y,z,t)|_{\Sigma} &= u^1, \quad v(x,y,z,t)|_{\Sigma} = v^1, \\ w(x,y,z,t)|_{\Sigma} &= w^1, \quad T(x,y,z,t)|_{\Sigma} = T_1 \end{aligned}$$

Заменяя производные в уравнениях (9) и начальных условиях (18) соответствующими конечно-разностными соотношениями и разрешая полученные конечно-разностные уравнения относительно следующих узловых точек искомым функций $u_{i,j,k}^{n+1}, v_{i,j,k}^{n+1}, w_{i,j,k}^{n+1}$ и $T_{i,j,k}^{n+1}$, получим следующие рекуррентные соотношения:

$$\begin{aligned} u_{i,j,k}^{n+1} = \frac{\tau^2}{\rho} \left[C_{1111} \frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{h_1^2} + C_{1212} \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{h_2^2} + C_{1313} \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{h_3^2} + \right. \\ \left. + (C_{1122} + C_{1212}) \frac{v_{i+1,j+1,k}^n - v_{i+1,j-1,k}^n - v_{i-1,j+1,k}^n + v_{i-1,j-1,k}^n}{4h_1h_2} + (C_{1133} + C_{1313}) \times \right. \\ \left. \times \frac{w_{i+1,j,k+1}^n - w_{i-1,j,k+1}^n - w_{i+1,j,k-1}^n + w_{i-1,j,k-1}^n}{4h_1h_3} - \beta_{11} \frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i-1,j,k}^n}{2h_1} - f_{i,j,k} \right] + 2u_{i,j,k}^n - u_{i,j,k}^{n-1} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
T_{i,j,k}^{n+1} = & \frac{\tau}{c_\varepsilon} \left[\lambda_{11} \frac{T_{i+1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n}{h_1^2} + \lambda_{22} \frac{T_{i,j+1,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j-1,k}^n}{h_2^2} + \right. \\
& + \lambda_{33} \frac{T_{i,j,k+1}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j,k-1}^n}{h_3^2} - T_0 \left(\beta_{11} \frac{u_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i-1,j,k}^{n+1} - u_{i+1,j,k}^{n-1} + u_{i-1,j,k}^{n-1}}{4h_1\tau} \right. \\
& \left. \left. + \beta_{22} \frac{v_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j-1,k}^{n+1} - v_{i,j+1,k}^{n-1} + v_{i,j-1,k}^{n-1}}{4h_2\tau} + \beta_{33} \frac{w_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k-1}^{n+1} - w_{i,j,k+1}^{n-1} + w_{i,j,k-1}^{n-1}}{4h_3\tau} \right) \right] + T_{i,j,k}^n.
\end{aligned} \tag{20}$$

Соотношения для $v_{i,j,k}^{n+1}, w_{i,j,k}^{n+1}$ можно найти выше указанным образом. Уравнения (19)-(20) позволяют найти значения перемещений и температуры на слое $(n+1)$, если известны значения перемещений на двух предыдущих слоях. Значения перемещений на двух начальных слоях $(n=0, n=1)$ можно найти из начальных и краевых условий. На последующих слоях $n=2,3,4,\dots$ значения перемещений и температуры находятся по соотношениям (19-20).

Кроме этого можно построит и неявные конечно-разностные уравнения. Для чего, в слагаемых содержащих главные неизвестные, индекс n заменяем на $n+1$ и полученные схемы становятся неявными, для сходимости которых, нет ограничений относительно шагов сетки по времени.

$$\begin{aligned}
C_{1111} \frac{u_{i+1,j,k}^{n+1} - 2u_{i,j,k}^{n+1} + u_{i-1,j,k}^{n+1}}{h_1^2} + C_{1212} \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{h_2^2} + C_{1313} \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{h_3^2} + \\
+ (C_{1122} + C_{1212}) \frac{v_{i+1,j+1,k}^n - v_{i-1,j+1,k}^n - v_{i+1,j-1,k}^n + v_{i-1,j-1,k}^n}{4h_1h_2} + (C_{1133} + C_{1313}) \times \\
\times \frac{w_{i+1,j,k+1}^n - w_{i-1,j,k+1}^n - w_{i+1,j,k-1}^n + w_{i-1,j,k-1}^n}{4h_1h_3} - \beta_{11} \frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i-1,j,k}^n}{2h_1} - f_{1,i,j,k} = \rho \frac{u_{i,j,k}^{n+1} - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k}^{n-1}}{\tau^2}.
\end{aligned} \tag{21}$$

Конечно-разностное уравнение (21) приведём к следующему виду

$$a_i u_{i+1,j,k}^{n+1} + b_i u_{i,j,k}^{n+1} + c_i u_{i-1,j,k}^{n+1} = d_i, \tag{22}$$

где

$$\begin{aligned}
a_i = \frac{C_{1111}}{h_1^2}, \quad b_i = -2\left(\frac{C_{1111}}{h_1^2} + \frac{\rho}{\tau^2}\right), \quad c_i = \frac{C_{1111}}{h_1^2} \\
d_i = \rho \frac{-2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k}^{n-1}}{\tau^2} - \left(C_{1212} \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{h_2^2} + C_{1313} \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{h_3^2} + \right. \\
+ (C_{1122} + C_{1212}) \frac{v_{i+1,j+1,k}^n - v_{i-1,j+1,k}^n - v_{i+1,j-1,k}^n + v_{i-1,j-1,k}^n}{4h_1h_2} + \\
\left. + (C_{1133} + C_{1313}) \frac{w_{i+1,j,k+1}^n - w_{i-1,j,k+1}^n - w_{i+1,j,k-1}^n + w_{i-1,j,k-1}^n}{4h_1h_3} \right) + \beta_{11} \frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i-1,j,k}^n}{2h_1} + f_{1,i,j,k}.
\end{aligned}$$

Вычислив значения искомой функции на двух начальных слоях уравнение (22) совместно с граничными условиями $u_i|_{\Sigma_i} = u_i^0$ решается методом прогонки. Изменяя $j, k = \overline{1, N-1}$ найдём значения перемещений u во всех внутренних точках сетки на слое $(k+1)$. Таким же способом вычисляются значения

перемещений v и w , а значения температуры T вычисляются таким же способом начиная с первого слоя. После вычисления всех численных значений искомых функций, определяются зоны пластичности и вычисления проводятся заново.

Третья глава названная «**Расчет пластических и термопластических деформаций трансверсально изотропного параллелепипеда**» посвящена численному решению и обоснованию справедливости алгоритма и математических моделей описывающих процесс пластического и термопластического деформирования трансверсально изотропных тел. С этой целью решены численно ряд пластических, связанных и несвязанных термопластических краевых задач для трансверсально изотропного параллелепипеда при термомеханических нагрузках.

В параграфе 3.1 численно решена задача о сжатии упруго-пластического трансверсально изотропного параллелепипеда между жесткими плитами. Математическая модель этой задачи описывается нелинейной краевой задачей (6-8) со следующими граничными условиями:

$$u_1 = -u^0, u_2 = 0, u_3 = 0 \quad \text{при } x=l_1$$

$$u_1 = u^0, u_2 = 0, u_3 = 0 \quad \text{при } x=0$$

на остальных гранях

$$u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 0, \quad \text{при } x_2 = 0, l_2$$

$$u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 0, \quad \text{при } x_3 = 0, l_3.$$

При численном решении упругие постоянные, касательные модули и пределы упругости для трансверсально изотропного материала имели следующие значения:

$$C_{1122} = 0.21, C_{1133} = 0.19, C_{2233} = 0.19, C_{3333} = 5.35, C_{2323} = 2.39, C_{1313} = 2.39, C_{1212} = 2.735,$$

$$C_{1111} = 5.68, C_{2222} = 5.68, \lambda'_2 = 2.5, \lambda'_3 = 2.24, p^* = 0.11, q^* = 0.04, h = 0.1, N = 10.$$

Ниже на рис.1-2 показаны распределения зон пластичности в различных сечениях рассматриваемого трансверсально изотропного упругопластического параллелепипеда.

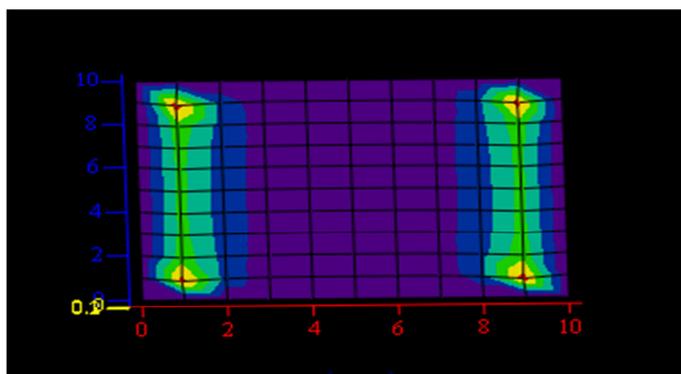


Рис. 1. Зона пластичности в плоскости XOY при $z=0.1$ ($p \geq p^*$)

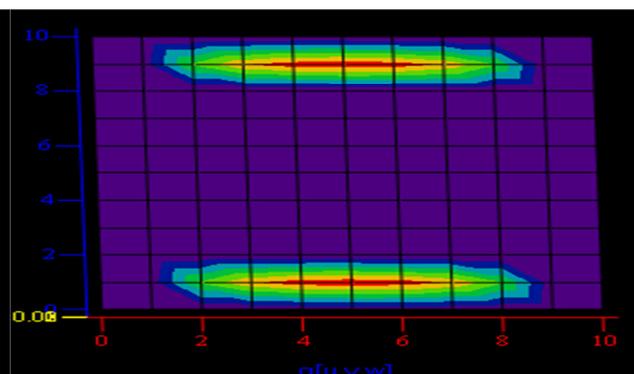


Рис. 2. Зона пластичности в плоскости ZOY при $x=0.3$ ($q \geq q^*$)

С учетом симметричности граничных условий, численные результаты и приведенные распределения зон пластичности в соответствующих сечениях указанных на рисунках (1-2), также являются симметричными, что

обеспечивает справедливости численных результатов и предложенного конечно-разностного итерационного подхода для решения упругопластических краевых задач трансверсально изотропных тел.

Численные результаты определены с точностью $\varepsilon = 0.0001$, для достижения которых потребовалось 46 итераций.

В параграфе 3.2 решена численно задача (6-8) о равновесии упругопластического трансверсально изотропного параллелепипеда под действием равномерно распределённой нагрузки. Пусть параллелепипед сжимается по двум граням перпендикулярным к оси OX_1 , а остальные грани свободны от нагрузок, т.е.

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{x_1=0} &= s_1, \quad \sigma_{11}|_{x_1=\ell_1} = -s_1, \quad \sigma_{21}|_{x_1=0, \ell_1} = 0, \quad \sigma_{31}|_{x_1=0, \ell_1} = 0, \\ \sigma_{22}|_{x_2=0, \ell_2} &= 0, \quad \sigma_{21}|_{x_2=0, \ell_2} = 0, \quad \sigma_{23}|_{x_2=0, \ell_2} = 0, \\ \sigma_{33}|_{x_3=0, \ell_3} &= 0, \quad \sigma_{13}|_{x_3=0, \ell_3} = 0, \quad \sigma_{23}|_{x_3=0, \ell_3} = 0, \end{aligned}$$

Исходные данные аналогичны данным предыдущего параграфа, значения дополнительных констант: $p^* = 0.1$, $q^* = 0.1$, $\lambda_2' = 1.6$, $\lambda_3' = 0.7$, $\ell_i = 1$, $i = \overline{1,3}$

Таблица 1.

Значения перемещений полученных разными методами

Теории пластичности (ТП) трансверсально изотропных тел	u(3,3,3)	v(3,2,1)	w(3,5,4)
ТП с поверхностью нагружений в пространстве деформаций	0,046495	-0,005916	-0,00076
ТП с поверхностью нагружений в пространстве напряжений	0,04925	-0,006055	-0,00076
Предлагаемый метод	0,0479	-0,00805	-0,000755

В таблице 1 приведены значения перемещений полученные по деформационной теории трансверсально изотропных тел и сравнены с численными результатами полученными в работах Халджигитова А.А. на основе других методов и теорий. Совпадение численных результатов показывает справедливость применяемого в работе конечно-разностного итерационного метода.

В параграфе 3.3 исследован расчёт пластических деформаций трансверсально-изотропного параллелепипеда сжимающего куполообразной нагрузкой, приложенных по противоположным граням перпендикулярных к оси OX_1 , т.е. $S = \pm(1 - \cos 2\pi x_2)(1 - \cos 2\pi x_3)$ при $x_1 = 0, \ell_1$.

Остальные грани параллелепипеда свободны от нагрузок. Исходные данные заданы как в предыдущей задаче, отличные от них постоянные следующие:

$$p^* = 0.1, \quad q^* = 0.001, \quad \varepsilon = 0.0001.$$

Ниже в таблице 2 приведено распределение значений компоненты тензора напряжений σ_{11} на границе параллелепипеда, где приложена куполообразная нагрузка. Заметим, что они симметричные и согласно краевым условиям

максимальное значение нагрузки $\sigma_{11} = S = 4$ достигается в середине грани и по краям они равны нулю.

Таблица 2.

Распределение компоненты тензора напряжения σ_{11} при $x=0$

	z=0	z=0.1	z=0.2	z=0.3	z=0.4	z=0.5	z=0.6	z=0.7	z=0.8	z=0.9	z=1
y=0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y=0.1	0	0,0365	0,132	0,25	0,3455	0,382	0,3455	0,25	0,132	0,0365	0
y=0.2	0	0,132	0,4775	0,9045	1,25	1,382	1,25	0,9045	0,4775	0,132	0
y=0.3	0	0,25	0,9045	1,7135	2,368	2,618	2,368	1,7135	0,9045	0,25	0
y=0.4	0	0,3455	1,25	2,368	3,2725	3,618	3,2725	2,368	1,25	0,3455	0
y=0.5	0	0,382	1,382	2,618	3,618	4	3,618	2,618	1,382	0,382	0
y=0.6	0	0,3455	1,25	2,368	3,2725	3,618	3,2725	2,368	1,25	0,3455	0
y=0.7	0	0,25	0,9045	1,7135	2,368	2,618	2,368	1,7135	0,9045	0,25	0
y=0.8	0	0,132	0,4775	0,9045	1,25	1,382	1,25	0,9045	0,4775	0,132	0
y=0.9	0	0,0365	0,132	0,25	0,3455	0,382	0,3455	0,25	0,132	0,0365	0
y=1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

В таблице 3 сравнены значения компонентов вектора перемещений в некоторых точках параллелепипеда полученные по различным методам. Сравнение с известными результатами показывает достаточную их близость, и эффективность применяемого конечно-разностного итерационного метода.

Таблица 3.

Значения компонентов вектора перемещений в некоторых точках параллелепипеда

Итерационные методы	u(3.4.3)	v(3.2.1)	w(3.5.4.)
Метод упругих решений	4.79-02	-8.03-03	-7.55-04
Двухступенчатый метод	4.80-02	-8.19-03	-7.56-04
Предлагаемый метод	4.55-02	-8.09-03	-7.36-04

В параграфе 3.4 рассмотрена термопластическая краевая задача (15-17) о защемленном со всех сторон трансверсально изотропном параллелепипеде со следующим внутренним температурным полем

$$T(x_1, x_2, x_3) = T_0 \sin \frac{\pi x_1}{\ell_1} \sin \frac{\pi x_2}{\ell_2} \sin \frac{\pi x_3}{\ell_3}.$$

Исходные данные заданы как в предыдущей задаче, отличные от них постоянные следующие:

$$\lambda_2^i = 2.5, \lambda_5^i = 2.24, \beta_{11} = 0.25, \beta_{22} = 0.25, \beta_{33} = 0.37, p^* = 0.14, q^* = 0.11, T_0 = 20.$$

Ниже на рисунках 3-4 показаны распределения зон пластичности в плоскости XOY при $z=0.7$ рассматриваемого трансверсально изотропного параллелепипеда.

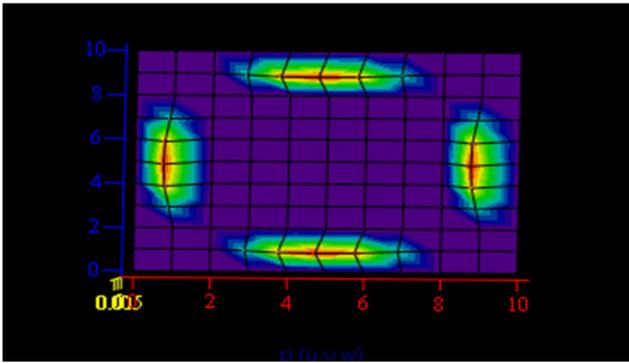


Рис. 3. Зона пластичности в плоскости XOY при $z=0,7$ ($p \geq p^*$)

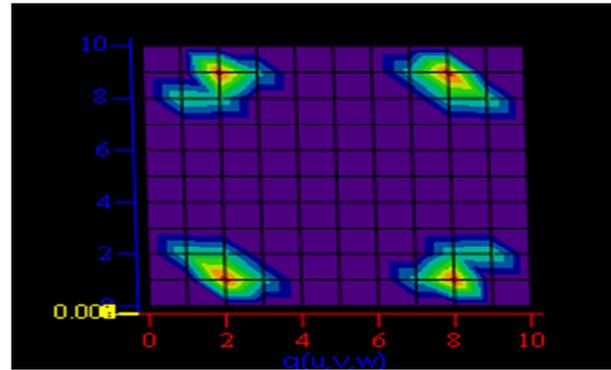


Рис. 4. Зона пластичности в плоскости XOY при $z=0,7$ ($q \geq q^*$)

Так как граничные условия заданы симметрично, численные результаты в рисунках (3-4) полученные выше указанным итерационным методом распределены симметрично в рассматриваемом параллелепипеде, что обеспечивает справедливость численных результатов и предложенного итерационного подхода для решения термопластических задач для трансверсально изотропных тел.

В параграфе 3.5 численно решена связанная термопластическая динамическая краевая задача (9-14) о трансверсально изотропном параллелепипеде. При численном решении модельной задачи были заданы следующие начальные условия

$$u(x, y, z, t)|_{t=0} = 0, \quad v(x, y, z, t)|_{t=0} = 0, \quad w(x, y, z, t)|_{t=0} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial t}|_{t=0} = 0,$$

$$T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0 \sin(\pi x) \sin(\pi y) \sin(\pi z),$$

и граничные условия

$$u(x, y, z, t)|_{\Sigma} = 0, \quad v(x, y, z, t)|_{\Sigma} = 0,$$

$$w(x, y, z, t)|_{\Sigma} = 0, \quad T(x, y, z, t)|_{\Sigma} = 0.$$

Исходные данные как в предыдущей задаче, отличные от них постоянные следующие:

$$b_{11}=0.25, \quad b_{22}=b_{11}, \quad b_{33}=0.37, \quad \lambda_{11}=0.03, \quad \lambda_{22}=0.03, \quad \lambda_{33}=0.01, \quad \lambda_2' = 2.5, \quad \lambda_5' = 2.24, \quad \rho=0.81,$$

$$c_\varepsilon=3.5, \quad \lambda_2' = 2.5, \quad \lambda_5' = 2.24, \quad \tau=0.01, \quad h=0.1 \quad p^* = 0.08, \quad q^* = 0.04, \quad T_0 = 20, \quad N_1 = N_2 = N_3 = 10.$$

Ниже приведены зоны пластичности в различных слоях по времени и сечениях рассматриваемого трансверсально изотропного параллелепипеда.

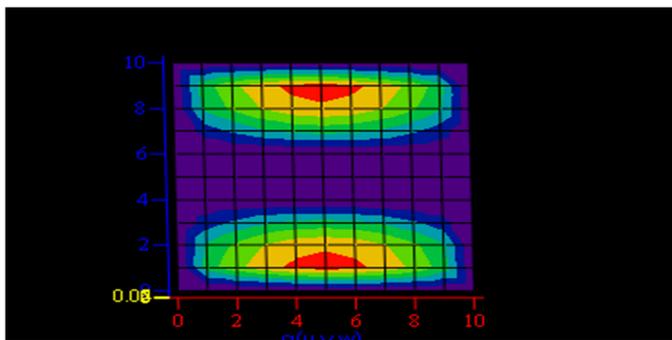


Рис. 5. Зона пластичности в плоскости XOY при $z=0.8, t=0.07$ ($q \geq q^*$), $q^*=0.04$

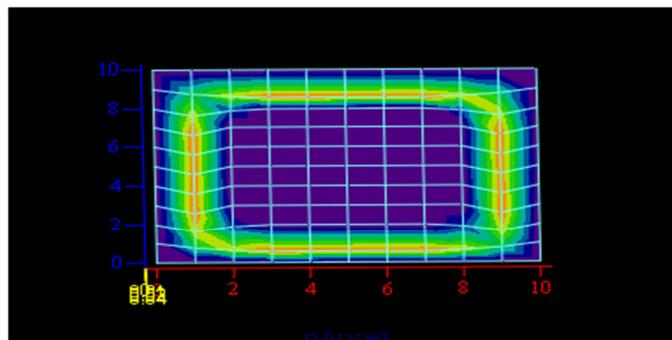


Рис. 6. Зона пластичности в плоскости XOY при $z=0.7, t=0.07$ ($p \geq p^*$), $p^*=0.08$

Напомним, что, в рассматриваемой модельной задаче для трансверсально изотропного материала, осью вращения является ось OZ . Так как начальные и граничные условия заданы симметрично, можно увидеть симметричность перемещений $u(x,y,z)$ и $v(x,y,z)$, а перемещения $w(x,y,z)$ отличны от других, что показывает влияние анизотропии на упруго-пластическое состояние трансверсально изотропного параллелепипеда.

В параграфе 3.6 приведена инструкция по использованию комплекса программ «Комплекс программ для численного решения нелинейных задач теории упругости и термоупругости анизотропных тел», разработанного в среде Delphi7 с интеграцией OpenGL.

Данный комплекс программ предназначенный для численного решения нелинейных задач теории упругости и термоупругости анизотропных тел имеет следующие возможности:

численное решение задачи о сжатии пластического трансверсально изотропного параллелепипеда между жесткими плитами;

численное моделирование задачи о равновесии трансверсально изотропного пластического параллелепипеда под действием равномерно распределенной нагрузки;

расчет пластических деформаций трансверсально изотропного параллелепипеда под действием куполообразной нагрузки;

расчет термопластических деформаций трансверсально изотропного параллелепипеда;

связанная термопластическая краевая задача о трансверсально изотропном параллелепипеде.

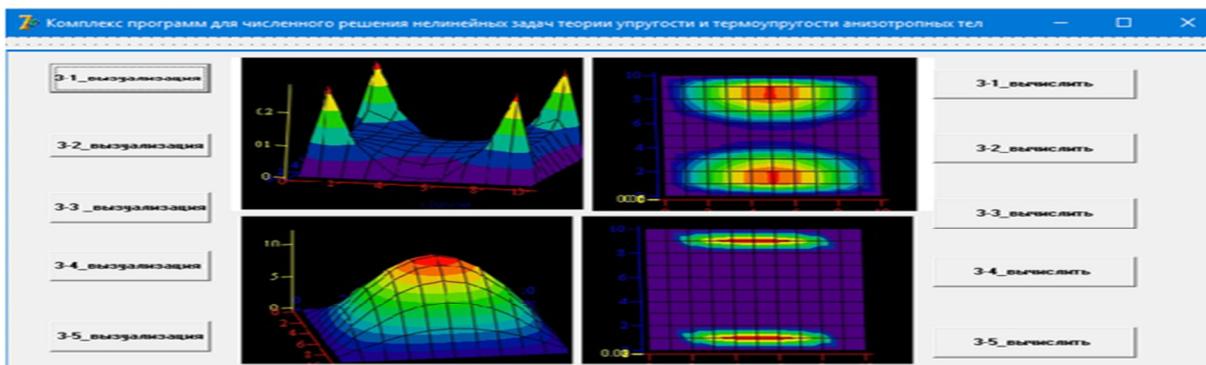


Рис. 7. Главное окно программы.

При запуске программы появляется главная форма (рис. 7), в которой можно выбрать тип задачи из выше приведённого списка решаемых задач.

Данное программное средство может быть использовано при расчете и определении запасов прочности конструкций и их элементов из композиционных материалов находящихся под тепломеханическими воздействиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертационной работе на тему «Численное моделирование процесса нелинейного деформирования анизотропных тел» получены следующие основные результаты:

1. Разработаны модельные уравнения пластических и термопластических задач для деформационной теории трансверсально изотропных тел. Модельные уравнения сформулированы в виде связанных и несвязанных краевых задач.

2. Разработаны численные модели пластических и термопластических краевых задач для трансверсально изотропных тел при различных граничных условиях.

3. Предложен и обоснован новый подход для численного решения трёхмерных упругопластических и термопластических краевых задач для трансверсально изотропных тел.

4. Разработаны вычислительные алгоритмы и программные средства для численного решения пластических, термопластических связанных и несвязанных краевых задач, позволяющие исследовать напряженно-деформированное состояние анизотропных тел под термомеханическими воздействиями.

5. Решены численно упругопластические, связанные и несвязанные термопластические краевые задачи для трансверсально изотропного параллелепипеда при различных граничных условиях.

6. Разработанные численные алгоритмы и программные средства были применены на объектах «Архитектурно-строительное управление», ЧП «Шохназара и Гайрата Ибодуллаевых» в Багатском районе Хорезмской области и ООО «DAMIR QURILISH SERVIS» в Джамбайском районе Самаркандской области. В результате использования программного средства обеспечена возможность повысить производительность на 8-10% и снизить затраты на 7-10%.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.13/30.12.2019.T.07.01 AT TASHKENT UNIVERSITY OF
INFORMATION TECHNOLOGIES**

**SCIENTIFIC AND INNOVATION CENTER OF INFORMATION AND
COMMUNICATION TECHNOLOGIES AT THE TASHKENT UNIVERSITY
OF INFORMATION TECHNOLOGIES**

BABAJANOV MUMIN RAJABOVICH

**NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS OF NONLINEAR
DEFORMATION OF ANISOTROPIC BODIES**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes

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

Tashkent – 2021

The theme of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2019.4.PhD/T1428

The dissertation has been prepared at Scientific and Innovation Center of Information and Communication Technologies at the Tashkent University of Information Technologies.

The abstract of the dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website www.tuit.uz and an the website of «ZiyoNet» Information and educational portal www.ziynet.uz.

Scientific adviser: **Khaldjigitov Abduvali Abdisamatovich**
Doctor of Physical-Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Nazirova Elmira Shodmonovna**
Doctor of Technical Sciences, Docent

Isomiddinov Anvar Inomjonovich
Doctor of Philosophy on Technical Science

Leading organization: **Tashkent State Transport Universite**

The defense will take place “_____” _____ 2021 y at _____ the meeting of Scientific council No. DSc.13/30.12.2019.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resourse Centre of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under No. _____). (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52).

Abstract of dissertation sent out on “_____” _____ 2021 y.
(mailing report No. ____ on “_____” _____ 2021 y.).

R. Kh. Khamdamov
Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

F.M. Nuraliev
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Docent

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

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work. Development of mathematical models, numerical algorithms and software for calculating the process of nonlinear deformation of anisotropic bodies.

The object of the research work are the processes of dynamic and static deformation of structures made of plastic and thermoelastoplastic transversely isotropic materials.

The scientific novelty of the research is as follows:

mathematical models of plastic and thermoplastic problems for transversely isotropic bodies have been developed on the basis of deformation theory at various mechanical and temperature initial and boundary conditions;

explicit and implicit grid equations for the numerical solution of static and dynamic, coupled and uncoupled unrelated problems of thermo-elastic-plasticity are constructed;

an effective numerical method has been developed for solving the modeling equations of the nonlinear deformation of anisotropic bodies under various thermomechanical factors;

computational algorithms and software for the numerical solution of plastic and thermoplastic coupled and uncoupled boundary value problems have been developed, which makes it possible to study the stress-strain state of anisotropic bodies under the influence of various mechanical and temperature forces;

Implementation of research results. Mathematical models, numerical computational algorithms and software tools developed to study the process of nonlinear deformation of anisotropic bodies:

the developed computational algorithms and software tools for the numerical solution of plastic and thermoplastic coupled and uncoupled boundary value problems, allowing to study the stress-strain state of anisotropic bodies, under the influence of mechanical and thermal forces, have been introduced into the objects of the «Department of Architecture and Construction» Bagat district, Khorezm region (Ministry for the Development of Information Technologies and Communications, certificate №33-8/9024 of December 23, 2019, Ministry of Construction, certificate №10159/09-07 of December 23, 2019). As a result, it is possible to increase work productivity by 8-10% and reduce costs by 7-10%;

the developed numerical algorithms and software for assessing the effect of stress distribution, temperature and anisotropy on the stress-strain state and the appearance of plastic zones in transversely isotropic bodies have been introduced into the facilities of «DAMIR QURILISH SERVIS» LLC, Dzhambai district, Samarkand region (Ministry of Construction, reference №10159/09-07 of 23.12.2019, Ministry for the Development of Information Technologies and Communications, certificate № 33-8/9024 of 23.12.2019). As a result, it is possible to increase work productivity by 10-15% and reduce costs by 10-15%.

Publication of research results. On the topic of the dissertation, 25 scientific works were published, of which 10 journal articles, including 3 in foreign and 7 in republican journals, recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of doctoral dissertations, 2 certificates of registration of software products for computers were also received.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, conclusion, list of references and appendices. The volume of the dissertation is 101 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (1 часть; part 1)

1. Khaldjigitov A.A., Babajanov M.R., Kalandarov A.A., Khudazarov R.S. Coupled dynamic thermoplasticity problem for transversally isotropic parallelepipeds // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – Vol 8, Issue 7. – P. 3958-3964. (№3; Scopus; IF=0.7).
2. Бабажанов М.Р., Худазаров Р.С. Математическое моделирование термоупругих задач для трансверсально изотропного параллелепипеда // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2017. – № 3(9) . – С. 22-29. (05.00.00; №23)
3. Бабажанов М.Р., Адамбаев У.Э. Моделирование процесса деформирования композитных материалов с помощью средств пакета ANSYS // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2018. – № 4(9). – С. 27-38. (05.00.00; №23)
4. Халджигитов А.А., Бабаджанов М.Р., Худазаров Р.С. Об одном подходе численного решения упругопластических краевых задач // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2019. – №3(21). – С. 75-86.(05.00.00; №23)
5. Халджигитов А.А., Бабаджанов М.Р., Адамбаев У.Э. Равновесие параллелепипеда по деформационной теории трансверсально изотропных сред // Проблемы механики. – 2000. – №4-5. – С.12-16. (05.00.00; №6)
6. Бабаджанов М.Р., Кодиров А.У., Худазаров Р.С. Деформационная теория трансверсально изотропных сред // Проблемы механики. – 2001. – №2. – С. 3-6. (05.00.00; №6)
7. Халджигитов А.А., Эгамбердиев Б., Бабаджанов М.Р. К теории пластического течения // Вестник НУУз. – 2010. – №3. – С. 189-192. (01.00.00; №8)
8. Адамбаев У.Э., Каландаров А.А., Бабажанов М.Р. Итерационный метод типа Либмана для численного решения двумерных задач теории упругости // Вестник НУУз. – 2013. – №2. – С. 23-25. (01.00.00; №8)
9. Yusupov Y.S., Babadjanov M.R. Numerical solution of a Three-Dimensional Coupled thermoplastic problem based on deformation theory // The International Journal Of Science & Technoledge. – 2019. – Vol. 7, Issue 9. – P. 23-31. (№6; International Impact Factor Services; IF=0.981)
10. Kalandarov A.A., Babadjanov M.R. Numerical simulation of the coupled dynamic thermoelastic problem for orthotropic bodies // International Journal Of Computer Science And Mobile Computing. – 2019. – Vol 8, Issue 9. – P. 182-189. (№23; Scientific Journal Impact Factor; IF= 6.745)

II бўлим (2 часть; part 2)

11. Babajanov M. R., Kalandarov A.A., Adambaev U.E. Numerical modeling of the process of thermoplastic deformation of transversally isotropic parallelepipeds // International Journal Of Innovative Technology And Exploring Engineering. – 2020. – Vol. 9, Issue 6. – P. 1484-1491.
12. Халджигитов А.А, Адамбаев У.Э., Бабажанов М.Р. Конечно-разностный метод решения упругопластических задач анизотропных тел // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – №4. – С. 9-25.
13. Khaldjigitov A., Adambaev U., Babadjanov M., Flow theories for transversely isotropic materials // Proc. of 4th Euromech, June 26-30, France. – Metz, 2000. – P. 346.
14. Khudazarov R.S., Babajanov M.R., Defining relations for thermal plasticity for transversely isotropic materials // Trans. of The International Scientific Conference “Perspectivies For The Development Of Infomation Technologies ITPA 2014”, 4-5 November. – Tashkent, 2014. – P. 155-158.
15. Худазаров Р.С., Бабажанов М.Р., Математическое моделирование процесса деформирования вязкопластических материалов //Радиоэлектроника, информационные и телекоммуникационные технологии: проблемы и развитие : сб. статей междунар.науч.-технич. конф. Т. 1. – Ташкент, 2015. – С. 66-68.
16. Бабажанов М.Р., Математическое моделирование термопластичности для трансверсально-изотропных материалов // Радиоэлектроника, информационные и телекоммуникационные технологии: проблемы и развитие : сб. статей междунар. науч.-технич. конф. Т. 1. – Ташкент, 2015. – С. 200-203.
17. Hudazarov R. S., Babajanov M. R., Modeling of thermoelastic task for isotropic and anisotropic bodies // Trans. of The International Scientific Conference “Perspectivies for the Development of Information Technologies ITPA 2015”, 4-5 November. – Tashkent, 2015. – P. 326-329.
18. Бабажанов М.Р., Ғоибов Ж. Деформацияланиш жараёнини модел-лаштиришга замонавий технологиялар татбиқи // Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги ТАТУ Қарши филиали “Таълим ва илмий тадқиқотлар самарадор-лигини оширишда замонавий ахборот-коммуникация технологияларининг ўрни. 2017. С.529-530.
19. Бабажанов М.Р., Худазаров Р.С., Анизотроп материалларнинг деформацияланиш жараёнини моделлаштиришга замонавий технологиялар татбиқи // Фан ва техниканинг ривожланишида замонавий инновацион технологияларнинг ўрни : илмий амалий конференция материаллар туплами, 27-28 сентябрь 2018 й. – Наманган, 2018. Б. 116 -117.
20. Бабажанов М.Р., Худазаров Р.С., ЧЭУ нинг анизотроп материаллар деформацияланиш жараёнини моделлаштириш ва ечишга

татбиқи // Фаргона водийси худудларидаги маҳаллий хом-ашёлардан фойдаланиш асосида импорт ўрнини босувчи маҳсулотлар ишлаб чиқаришнинг долзарб масалалари : халқаро конференцияси материаллар туплами, 27-28 октябрь. – Наманган, 2018. – Б. 321-324.

21. Халджигитов А.А., Бабажанов М.Р. Математическое моделирование процесса деформирования вязкопластических материалов // Материалы XVIII Международной научно-методической конференции, 8-9 февраля 2018 г. – Воронеж, 2018. – С. 222-224.

22. Халджигитов А.А., Бабаджанов М.Р. Один подход к численному решению упругопластических краевых задач // Инновацион гоёлар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда куллашнинг замонавий муаммолари : халқаро илмий-амалий анжуман туплами, 15 апрель 2019 й. – Андижон, 2019. – Б. 423-425.

23. Худазаров Р.С., Бабажанов М.Р. Трансверсал изотроп параллеле- лепипед учун термоэластик масала // Иқтисодийнинг тармоқларини ривожланишида ахборот-коммуникация технологияларининг ахамияти: республика илмий техник анжумани маърузалар туплами, 14-15 март 2019 й. 2- қисм. – Тошкент, 2019. – Б. 121-124.

24. Бабажанов М.Р. Программа для ЭВМ «Комплекс программ численного решения процесса нелинейного деформирования анизотропных тел» // Электронный Депозитарий “AVTOR”. Свидетельство №3525, 30.10.2019 г.

25. Бабажанов М.Р., Адамбаев У.Э. Программа для ЭВМ «Комплекс программ для численного решения нелинейных задач теории упругости и термоупругости анизотропных тел» // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 09520, 16.09.2020 г.

«Ҳисоблаш ва амалий математика муаммолари» илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.