

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

НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК-ҚУРИЛИШ ИНСТИТУТИ

ИСМОИЛОВ ШОҲИМАРДОН МУҲАММАДЖОНОВИЧ

ҲАРОРАТНИ ҲИСОБГА ОЛГАН ҲОЛДА ФАЗОВИЙ
ЮКЛАНИШЛАРДАГИ СТЕРЖЕНЛАРНИНГ ГЕОМЕТРИК
НОЧИЗИҚЛИ ЖАРАЁНЛАРИНИ МАТЕМАТИК
МОДЕЛЛАШТИРИШ

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

техника фанлари 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**

Исмоилов Шоҳимардон Муҳаммаджонович

Ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги
стерженларнинг геометрик ночизиқли жараёнларини математик
моделлаштириш 3

Исмоилов Шоҳимардон Муҳаммаджонович

Математическое моделирование геометрически нелинейных
процессов пространственного нагружения стержней с учетом
температуры..... 21

Ismoilov Shohimardon Mukhammadjonovich

Mathematical modeling of geometrically nonlinear processes of rods'
spatial loading taking into account temperature 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works

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

НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК-ҚУРИЛИШ ИНСТИТУТИ

ИСМОИЛОВ ШОҲИМАРДОН МУҲАММАДЖОНОВИЧ

ҲАРОРАТНИ ҲИСОБГА ОЛГАН ҲОЛДА ФАЗОВИЙ
ЮКЛАНИШЛАРДАГИ СТЕРЖЕНЛАРНИНГ ГЕОМЕТРИК
НОЧИЗИҚЛИ ЖАРАЁНЛАРИНИ МАТЕМАТИК
МОДЕЛЛАШТИРИШ

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2021

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2021.4.PhD/Т2085 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Наманган муҳандислик – қурилиш институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар: Анарова Шаҳзода Аманбаевна
техника фанлари доктори, доцент

Расмий оппонентлар: Назирова Элмира Шодмоновна
техника фанлари доктори, доцент
Файзиёв Бекзоджон Муртазаевич физика-
математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)

Етакчи ташкилот: Тошкент давлат транспорт университети

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил « 17 » декабр соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темура кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (2676- рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темура кўчаси, 108 - уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2021 йил « 9 » декабр куни тарқатилди.

(2021 йил « 02 » декабр даги 40 рақамли реестер баённомаси).



Р. Ҳ. Ҳамдамов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

Ф. М. Нуралиев

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д, доцент

Ш.А. Садуллаева

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф-м.ф.д., доцент

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда иншоот ва конструкцияларни лойиҳалашда қўлланиладиган материалларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини аниқлашнинг дастурий мажмуаларини ишлаб чиқиш ва мавжудларини такомиллаштиришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Шу жиҳатдан, ҳароратни ҳисобга олган ҳолда кўндаланг кесими ихтиёрий ва фазовий юкланишлардаги стерженларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнларини тадқиқ қилиш учун математик моделлар, самарали сонли ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуаларни ишлаб чиқиш ҳамда уларни такомиллаштириш ҳозирги вақтдаги асосий вазифалардан бири бўлиб қолмоқда. Дунёнинг ривожланган мамлакатлари, жумладан, АҚШ, Россия Федерацияси, Германия, Хитой, Австралия, Саудия Арабистони, Канада, Франция, Япония, Украина, БАА, Эрон, Миср Араб Республикаси, Қозоғистон ва бошқа мамлакатларда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизикли ва ҳароратни ҳисобга олган ҳолда деформацияланиш жараёнларининг такомиллаштирилган математик моделлари, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуаларини ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этмоқда.

Жаҳонда ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини аниқлашнинг такомиллаштирилган математик моделларини қуриш ва сонли ҳисоблаш алгоритмлари асосида дастурий мажмуаларини ишлаб чиқишга йўналтирилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу борада, ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг чўзилиш, қисилиш, эгилган буралиш, бўйлама эгилиш ва бўйлама буралишдаги кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини аниқлашнинг такомиллашган математик моделларини ва сонли ҳисоблаш алгоритмларини ҳамда дастурий мажмуаларини ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири. Шу билан бирга, кўндаланг кесими ихтиёрий бўлган фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларининг математик моделларини ва сонли ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқишни илмий асослаш ҳам долзарб масалалардан ҳисобланади.

Республикамизда «Давлат статистика қўмитаси маълумотларига кўра, 2021 йилнинг дастлабки 6 ойида металлургия саноатининг 1172 та кичик корхоналари томонидан 45,0 млрд. сўмлик маҳсулотлар ишлаб чиқарилган» бўлиб, мазкур металл конструкция маҳсулотлари замонавий архитектура қурилиш, шаҳарсозлик, машинасозлик, геология, ишлаб чиқариш ва бошқа соҳаларда кенг қўламда фойдаланилган. Шу сабабли, бундай стержень типидagi конструкцияларни лойиҳалаш мақсадида уларда юз берадиган деформацияланиш жараёнларини математик моделлаштириш, замонавий ахборот-коммуникация технологиялари ёрдамида кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини тадқиқ қилиш ва аниқлаш учун самарали сонли ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуаларини ишлаб чиқиш

ҳамда уларни такомиллаштириш бўйича кенг қамровли ишлар амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... иқтисодиёт, ижтимоий соҳага, бошқариш тизимига инфор­мацион-коммуникацион технологияларни жорий этиш, муҳандислик-коммуникация ва ижтимоий инфратузилмани ривожлантириш ҳамда модернизация қилиш»¹ вазифалари белгиланган. Ушбу вазифалардан ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стер­женларнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини аниқлашни автоматлаштирилган тизимларини ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси» тўғрисидаги Фармони, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 20 сентябрдаги ПҚ-4464-сон «Қурилиш соҳасига ахборот-коммуникация технологияларини кенг жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2020 йил 13 мартдаги ПҚ-5963-сон «Ўзбекистон Республикасининг қурилиш соҳасида ислохотларни чуқурлаштиришга доир кўшимча чора-тадбирлар тўғрисида» ги, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2021 йил 10 февралдаги ПҚ-4986-сон «Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини янада ривожлантиришга инвестицияларни жалб қилиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларга мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларни ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Термоэластиканинг фундаментал асосларига бағишланган кўплаб олимларнинг ишларида деформацияланиш термодинамик жараёндан иборат деб таъкидлаганлар. Ночизикли эластиклик назарияси доирасида деформацияланиш масалаларини ҳал қилиш бўйича хорижий олимлардан: В.Новацкий, Л.М.Зубов, А.И.Лурье, В.В.Новожилов, Л.Хаджиева, F.S.Bayones, A.M.Abd-Alla, R.Ghaffari, R.Sauer, Y.Y.Zhu, Y.Li, C.J.Cheng, D.Erdenebata, D.Waldmanna, F.Scherbauma, N.Teferleb, Y.Xia, Z.Ding, Fu.Kangsheng, Wu.Deng, J.Li, Lu.Zhongrong, M.R.Eslami, A.Y.Al-Ali, K.H.Almutairi, E.K.Rawu ва бошқалар илмий тадқиқотлар олиб борганлар ҳамда ушбу соҳага катта ҳисса қўшганлар.

Республикамизда стержень типдаги конструкцияларнинг назарий асосларини такомиллаштириш ва ҳисоблаш усулларини ишлаб чиқиш бўйича

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ-4947-сон Фармони

бир қатор олимлар томонидан илмий тадқиқот ишлари олиб борилган, жумладан, академик В.Қ.Қобулов томонидан конструкция элементларининг чизикли ва ночизикли деформацияланиш жараёнларининг Остроградский-Гамильтон тамойили асосида аниқлаштирилган назарияси ишлаб чиқилган ҳамда амалий масалаларни ечишга алгоритмик ёндашувлар таклиф этилган, кейинчалик академик Т.Бўриев, К.Ш.Бобомуродов, Б.Курманбаев, Т.Юлдашев, Ш.А.Назиров, Б.Мардонов, А.А.Халджигитов, А.Абдусаттаров, Р.Ш.Индиаминов, Ш.А.Анарова, Ф.М.Нуралиев ҳамда уларнинг шогирдлари томонидан ривожлантирилган ва ривожлантирилмоқда.

Тадқиқотлар таҳлили шуни кўрсатдики, ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини статик ва динамик, геометрик ночизикли жараёнларини математик моделлаштириш муаммоси долзарб бўлиб, ҳозирги кунда етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим ва илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Наманган муҳандислик-қурилиш институти ва М.Т.Ўрозбоев номидаги Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг илмий тадқиқот ишлари режасининг Т-ОТ-2021-175 «Фермер ва деҳқон хўжаликлари учун кичик ҳажмдаги картошка ковлагич» (2021) ва ФА-Ф-4-006- «Ихтиёрий йўналган сейсмик кучлар таъсиридаги текисликда ва фазовий жойлашган ер ости қувурлар тизимининг сейсmodинамикаси» (2019-2020) ҳамда ФА-Атех-2018-67 - «Зилзилаларда йиғилган реал маълумотларга асосланган сейсмик кучлар таъсиридаги ер ости қувурларининг реакциясини баҳолаш ва уларни амалиётга татбиқи» (2019-2020) мавзуларидаги лойиҳалар доирасида амалга оширилган.

Тадқиқотнинг мақсади ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларида статик ва динамик кучлар таъсирида математик моделни такомиллаштириш, ҳисоблаш алгоритмлари ҳамда дастурий мажмуани тузилмаси ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

В.Қ.Қобуловнинг аниқлаштирилган ва эластиклик назариялари ҳамда Остроградский-Гамильтон вариацион тамойили асосида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизикли жараёнлари математик моделини такомиллаштириш;

кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик-механик параметрларини рақамли бинар тасвирларни қайта ишлаш усули асосида сонли ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқиш;

фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизикли масалаларида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда сонли ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизиқли масалаларини чекли айирмалар ва матрицали ҳайдаш усулларини биргаликда қўллаган ҳолда чегаравий масалаларни ечишни дастурий мажмуа тузилмасини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизиқли хусусиятлари ва ҳароратни ҳисобга олган ҳолда деформацияланганлик жараёнлари олинган.

Тадқиқотнинг предметини ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизиқли жараёнларини тадқиқ этиш учун математик моделлар, сонли ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуа ташкил қилади.

Тадқиқотнинг усуллари.

Тадқиқот жараёнида деформацияланувчи қаттиқ жисмлар механикаси, вариацион ҳисоблаш математикаси, математик ва сонли моделлаштириш, алгоритмлаш назарияси, рақамли бинар тасвирларни қайта ишлаш усули, мураккаб стерженларнинг геометрик-механик параметрларини ҳисоблаш, замонавий дастурлаш технологиялари ва ҳисоблаш экспериментларини ўтказиш усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги куйидагилардан иборат:

В.Қ.Қобуловнинг аниқлаштирилган ва эластиклик назариялари ҳамда Остроградский-Гамильтон вариацион тамойили асосида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизиқли жараёнларини математик модели такомиллаштирилган;

кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик-механик параметрларини рақамли бинар тасвирларни қайта ишлаш усули асосида сонли ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган;

фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизиқли масалаларида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда сонли ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизиқли масалаларини чекли айирмалар ва матрицали ҳайдаш усулларини биргаликда қўллаган ҳолда чегаравий масалаларни ечишни дастурий мажмуа тузилмаси ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари куйидагилардан иборат:

ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизиқли кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини тадқиқ қилиш учун математик модели такомиллаштирилган;

чекли-айирмали, матрицали ҳайдаш, рақамли бинар тасвирларни қайта ишлаш усули ҳамда кетма-кет яқинлашиш усулларига асосан фазовий юкланишлардаги стерженларнинг ҳароратни ҳисобга олган ҳолда статик ва динамик, геометрик ночизиқли масалаларини ечиш учун ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган;

ишлаб чиқилган математик моделнинг алгоритмлари ишончлилигини асослайдиган, ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги

стерженларнинг чегаравий масалалари учун ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш имконини берувчи дастурий мажмуа ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги масаланинг математик қўйилиши ва уни ечиш учун қўлланилган Остроградский-Гамильтон вариацион тамойилининг қатъийлиги, фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг самарали ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилганлиги, стерженларда ҳароратни ҳисобга олган ҳолда масаланинг коррект қўйилганлиги, масалани ечишда чекли айирмали, матрицали ҳайдаш ҳамда кетма-кет яқинлашиш усулларида фойдаланилганлиги, ҳисоблаш алгоритмларининг турғунлиги тадқиқ қилинганлиги, шунингдек, аниқ аналитик ечим билан тақрибий ечимни қиёслаш орқали олинган натижаларнинг мувофиқлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти стерженларнинг фазовий юкланишлардаги геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда умумлашган математик моделларини Остроградский-Гамильтон тамойили асосида такомиллаштирилгани, ҳисоблаш алгоритмларини чекли-айирмали, матрицали ҳайдаш ҳамда кетма-кет яқинлашиш усуллари билан биргаликда қўллаган ҳолда ишлаб чиқилгани, шунингдек, кўндаланг кесими ихтиёрий фазовий юкланишлардаги стерженларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ этишга мўлжалланган масалаларни ечиш имконини берувчи дастурий мажмуанинг ишлаб чиқилгани билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стержень типидagi конструкциялар учун лойиҳа ҳисоб ишларини олиб боришда хом ашё, иш кучи ҳамда вақт сарфини камайтириш, бажарилган иш сифати ва меҳнат унумдорлигини ошириш, шунингдек, лойиҳалаш жараёнларини самарали ташкил этиш имкониятлари, ҳисоблаш қийин бўлган ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларининг такомиллаштирилган математик модели ва ҳисоблаш алгоритмларининг амалиётда қўлланилиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини тадқиқ қилиш учун такомиллаштирилган математик моделлар, алгоритмлар ва дастурий мажмуа асосида:

ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг статик, динамик ҳамда геометрик ночизикли масалаларини ечишнинг чекли-айирмали ва матрицали ҳайдаш усулларида асосланган ҳисоблаш тажрибаларини виртуал бажариш учун ишлаб чиқилган дастурий мажмуа «SARDOR LOYIHA DIZAYN SERVIS» ва «ZAMONAVIY LOYIHA XIZMATI» МЧЖларига жорий этилган (Ахборот технологиялари ва

коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 29 октябрдаги №33-8/7687 - сонли маълумотномаси). Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши қурилиш-монтаж ишларининг лойиҳалаш жараёнларида вақт сарфини камайиши ҳисобига иш унумдорлигини 8-10% га оширишга ҳамда ҳисоблаш аниқлигининг ортиши ҳисобига материал сарф-харажатларининг 5-10% га камайишига имкон берган;

хароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг кўндаланг кесими ихтиёрий бўлган геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларининг аниқлашда чекли-айирмали, матрицали ҳайдаш ва рақамли бинар тасвирларни қайта ишлаш усуллари билан биргаликда статик ва динамик масалаларини ечиш учун ҳисоблаш алгоритми асосида ишлаб чиқилган дастурий мажмуа «ПРОЕКТ-SERVIS» МЧЖга жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 29 октябрь №33-8/7687 сонли маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида лойиҳалаш жараёнлари учун вақт сарфининг камайиши ҳисобига иш унумдорлигининг 10-15% гача оширишга ҳамда ҳисоблаш аниқлигининг ортиши ҳисобига материал сарф-харажатларининг 1,2 марта камайишига имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 7 та халқаро ва 11 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот мавзуси бўйича жами 32 та илмий иш чоп этилган бўлиб, жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 11 та мақола, 8 таси республика ва 3 таси хорижий журналларда нашр қилинган, ҳамда 3 та ЭҲМ учун яратилган дастурий мажмуаларни қайд қилиш гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 119 саҳифани ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган. Тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари белгилаб олинган ҳамда тадқиқот объекти ва предмети тавсифланган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асослаб берилган, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «Стерженларнинг деформацияланишини математик моделлаштириш бўйича адабиётлар шарҳи» деб номланган

биринчи бобида фазовий юкланишлардаги стерженларнинг чизикли ва геометрик ночизикли кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳароратни ҳисобга олган ҳолдаги математик моделларини такомиллаштиришга қаратилган муаммоларни ўрганиш ҳолатини таҳлил қилишга бағишланган. Шунингдек, ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини математик қўйилиши кўриб чиқилган.

В.Қ.Қобулов томонидан конструкция элементларининг чизикли деформацияланиш жараёнларини аниқлаштирилган назарияси ишлаб чиқилган бўлиб, жисмнинг деформацияланиши термодинамик жараёндан иборат эканлиги таъкидланган.

Остроградский-Гамильтон вариацион тамойили куйидаги кўринишда ёзилади:

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

бу ерда K , Π^T - кинетик ва потенциал энергиялар ҳамда A - ташқи кучлар бажарган иш.

Власов-Джанелидзе-Қобуловларнинг аниқлаштирилган назарияси асосида бўйлама, кўндаланг ва буровчи кучларнинг биргаликдаги таъсирини ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стержень нуқталарининг кўчишини куйидаги тенглик кўринишида ифодалаш мумкин:

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, y, z, t) &= U(x, t) - z\alpha_1(x, t) - y\alpha_2(x, t) + \varphi(y, z)\mathcal{A}(x, t) + \\ &+ a_1\beta_1(x, t) + a_2\beta_2(x, t), \\ u_2(x, y, z, t) &= V(x, t) + z\theta(x, t), \quad u_3(x, y, z, t) = W(x, t) - y\theta(x, t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Бу ерда u_1, u_2, u_3 - кўчиш векторларини ташкил этувчилари; U, V, W - стерженнинг марказий нуқталарининг кўчиши; α_1, α_2 - соф эгилишдаги кўндаланг кесимни марказий ўққа нисбатан оғиш бурчаклари; β_1, β_2 - кўндаланг силжиш бурчаклари; θ - буралиш бурчаги; $\mathcal{A}(x, t)$ - узунлиги бўйича буралиш бурчаги; $a_1(y, z), a_2(y, z)$ - берилган функциялар; $\varphi(x, t)$ - буралишнинг Сен-Венан функцияси.

Коши муносабатларига кўра ночизикли деформацияланиш формуласини ҳисоблаш куйидагича бўлади:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

бу ерда u - жисм марказий нуқтасининг кўчишини ифодаловчи вектор.

Ҳарорат кўтарилганда жисмнинг элементлари кенгайди. Қаттиқ жисмда бундай кенгайиш, одатда, эркин ўтиши мумкин эмас ва кучланиш туфайли деформациялар пайдо бўлади. Гук қонунини қўлланилишида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда стерженларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатининг уч ўлчовли боғланиш тенгламалари куйидагича ифодаланади:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} - \alpha T &= \frac{1}{E}(\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33})); \quad \varepsilon_{22} - \alpha T = \frac{1}{E}(\sigma_{22} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{33})); \\ \varepsilon_{33} - \alpha T &= \frac{1}{E}(\sigma_{33} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{22})); \quad \gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G}; \quad \gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G}; \quad \gamma_{13} = \frac{\tau_{13}}{G}, \end{aligned} \quad (4)$$

бу ерда ифода (4) дан стерженларда кечаётган кўндаланг кучланишлар Бернулли гипотезасига асосан $\sigma_{22} = 0, \sigma_{33} = 0, \sigma_{31} = 0$ ни тенг эканлигини ҳисобга олиб, ҳароратга боғлиқ кучланганлик қуйидаги формула асосида ҳисобланади:

$$\sigma_{11}^T = \sigma_{11} + E\alpha T; \quad (5)$$

бу ерда α - чизикли кенгайиш коэффициентини, T - ҳарорат, E - эластиклик модули, μ - Пуассон коэффициентини, σ_{11}^T - ҳарорат билан кучланганлик, σ_{11} - ҳароратсиз кучланганлик.

Фазовий юкланишлардаги стерженнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини аниқлаш масаласида ҳароратни ҳисобга олиш мақсадга мувофиқлигини кўриш мумкин.

Юқоридаги назариялар асосида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрӣ стерженларда геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларини математик моделини такомиллаштириш долзарб масалалардан ҳисобланади.

Диссертациянинг «Стерженларнинг деформацияланиш жараёнларида ҳароратни ҳисобга олган ҳолдаги математик модели» деб номланган иккинчи бобида Власов-Джанелидзе-Кабуловнинг аниқлаштирилган назариясидан фойдаланган ҳолда Остроградский-Гамильтон тамойили асосида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг тебранишлари геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнларининг тенгламалари олинган. Математик моделни ишлаб чиқишда стерженларнинг кучланганлик-деформацияланганлик тензорлари ўртасидаги боғлиқлик ўрнатилган. Эластиклик назариясидан фойдаланилган ҳолда табиий бошланғич ва чегаравий шартлари билан иккинчи тартибли тўққизта геометрик ночизикли дифференциал тенгламалар тизими билан ифодаланган. Юқорида амалга оширилган ишларнинг барчаси, стерженларнинг геометрик ночизикли деформацияланиш жараёнининг математик моделини такомиллаштиришга қаратилган.

(1) ифодага мувофиқ мувозанат тенгламадаги кинетик энергиянинг умумий кўриниши қуйидагича бўлади:

$$\iint_{t \ v} \delta K dv dt = \frac{1}{2} \rho \int_t \int_v \delta \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} u_i \right] dv dt. \quad (6)$$

Кинетик энергия вариациясини ишлаб чиқишда (2) ифодадан фойдаланамиз.

Потенциал энергияни умумий кўриниши қуйидагича:

$$\int \int_t \int_v \Pi^T dv dt = \int \int_t \int_v \sigma_{ij}^T \delta \varepsilon_{ij} dv dt. \quad (7)$$

Потенциал энергия вариацияси (7) ифодага (2) ва (3) ифодаларни қўйиб, вариациялаб, интеграллаб, белгилашлар киритиб ишлаб чиқилади.

Фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженда ташқи кучлар бажарган ишнинг вариациясини ҳисоблаш формуласи қуйидагича:

$$\int \int_t \int_v \delta A dt = \int \int_t \sum_{i=1}^3 P_i \delta u_i dv dt + \int \int_t \sum_{i=1}^3 q_i \delta u_i ds dt + \int \int_{s_1} \sum_{i=1}^3 f_i \delta u_i ds_1 dt, \quad (8)$$

бу ерда P_i - ҳажмий кучларни ташкил этувчилар, q_i - юзага таъсир этувчи кучларни ташкил этувчилари, f_i - чегарага таъсир этувчи кучларни ташкил этувчилари.

Фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг кинетик (6), потенциал (7) энергиялар ва ташқи кучлар бажарган иш (8) ни (1) мувозанат тенгламасига қўйиб, геометрик нозикли деформацияланиш жараёнларида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда умумлашган математик модели ҳосил қилинган.

Ҳароратни ҳисобга олган ҳолдаги фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик нозикли деформацияланиш жараёнларини умумлашган тенгламалар системаси:

$$\begin{aligned} & -\rho F \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \rho S_y \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + \rho S_z \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} - \rho S_\varphi \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} - \rho S_{a_1} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} - \\ & - \rho S_{a_2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} + \frac{\partial N_x^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_u}{\partial x} + (\bar{P}_1 + \bar{q}_1) = 0; \\ & \rho S_y \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \rho I_y \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} - \rho I_{zy} \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} + \rho I_{z\varphi} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} + \rho I_{za_1} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} + \\ & + \rho I_{za_2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} - \frac{\partial M_y^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{\alpha_1}}{\partial x} + Q_{13} - (M_y^{\bar{P}_1} + M_y^{\bar{q}_1}) = 0; \\ & -S_{a_1} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + I_{a_1z} \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + I_{ya_1} \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} - I_{a_1\varphi} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} - I_{a_1^2} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} - I_{a_1a_2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} + \\ & + \frac{\partial M_{a_1}^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{\beta_1}}{\partial x} - Q_{a_1} + (M_{a_1}^{P_1} + M_{a_1}^{q_1}) = 0; \\ & -\rho F \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \rho S_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{\partial Q_{12}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_v}{\partial x} + (\bar{P}_2 + \bar{q}_2) = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
& \rho S_z \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \rho I_{yz} \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} - \rho I_z \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} + \rho I_{y\varphi} \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial t^2} + \rho I_{ya_1} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} + \\
& + \rho I_{ya_2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} - \frac{\partial M_z^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{a_2}}{\partial x} + Q_{12} - (M_z^{P_1} + M_z^{q_1}) = 0; \\
& - \rho S_{a_2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \rho I_{a_2z} \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + \rho I_{ya_2} \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} - \rho I_{a_2\varphi} \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial t^2} - \rho I_{a_1a_2} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} - \\
& - \rho I_{a_2^2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} + \frac{\partial M_{a_2}^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{\beta_2}}{\partial x} - Q_{a_2} + (M_{a_2}^{P_1} + M_{a_2}^{q_1}) = 0; \\
& - \rho F \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \rho S_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{\partial Q_{13}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_w}{\partial x} + (\bar{P}_3 + \bar{q}_3) = 0; \\
& - \rho S_y \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \rho S_z \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - \rho I_\rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_\theta}{\partial x} + (M_x^{P_{23}} + M_x^{q_{23}}) = 0; \\
& - \rho S_\varphi \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \rho I_{\varphi z} \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + \rho I_{y\varphi} \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} - \rho I_\varphi \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial t^2} - \rho I_{a_1\varphi} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} - \\
& - \rho I_{a_2\varphi} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} + \frac{\partial M_\varphi^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_\mathcal{G}}{\partial x} - M_\varphi + (M_\varphi^{P_1} + M_\varphi^{q_1}) = 0.
\end{aligned}$$

Умумлашган табиий бошланғич шартлар:

$$\begin{aligned}
& \rho \left[F \frac{\partial U}{\partial t} - S_y \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} - S_z \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + S_\varphi \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + S_{a_1} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} + S_{a_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta U \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[-S_y \frac{\partial U}{\partial t} + I_y \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + I_{zy} \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} - I_\varphi \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} - I_{a_1} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} - I_{a_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \alpha_1 \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[S_{a_1} \frac{\partial U}{\partial t} - I_{za_1} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} - I_{ya_1} \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + I_{\varphi a_1} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + I_{a_1^2} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} + I_{a_1a_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \beta_1 \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[F \frac{\partial V}{\partial t} + S_y \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \delta V \Big|_t = 0; \tag{10} \\
& \rho \left[-S_z \frac{\partial U}{\partial t} + I_{zy} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + I_z \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} - I_{y\varphi} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} - I_{ya_1} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} - I_{ya_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \alpha_2 \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[S_{a_2} \frac{\partial U}{\partial t} - I_{za_2} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} - I_{ya_2} \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + I_{\varphi a_2} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + I_{a_1a_2} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} + I_{a_2^2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \beta_2 \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[F \frac{\partial W}{\partial t} - S_z \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \delta W \Big|_t = 0; \rho \left[S_y \frac{\partial V}{\partial t} - S_z \frac{\partial W}{\partial t} + I_\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \delta \theta \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[S_\varphi \frac{\partial U}{\partial t} - I_{z\varphi} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} - I_{y\varphi} \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + I_\varphi \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + I_{\varphi a_1} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} + I_{\varphi a_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \mathcal{G} \Big|_t = 0.
\end{aligned}$$

Умумлашган табиий чегаравий шартлар:

$$\begin{aligned}
 & \left[-(N_x^T + \Psi_u) + \bar{f}_1 \right] \delta U \Big|_x = 0; \quad \left[-(M_y^T + \Psi_{\alpha_1}) + M_y^{f_1} \right] \delta \alpha_1 \Big|_x = 0; \\
 & \left[-(M_{\alpha_1}^T + \Psi_{\beta_1}) + M_{\alpha_1}^{f_1} \right] \delta \beta_1 \Big|_x = 0; \\
 & \left[-(Q_{12} + \Psi_v) + f_2 \right] \delta V \Big|_x = 0; \quad \left[-(M_z^T + \Psi_{\alpha_2}) + M_z^{f_1} \right] \delta \alpha_2 \Big|_x = 0; \\
 & \left[-(M_{\beta_2}^T + \Psi_{\beta_2}) + M_{\alpha_2}^{f_1} \right] \delta \beta_2 \Big|_x = 0; \quad \left[-(Q_{13} + \Psi_w) + \bar{f}_3 \right] \delta W \Big|_x = 0; \\
 & \left[-(M_x + \Psi_\theta) + M_\varphi^{f_1} \right] \delta \theta \Big|_x = 0; \quad \left[-(M_\varphi^T + \Psi_g) + M_x^{f_{23}} \right] \delta g \Big|_x = 0.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Диссертациянинг «Деформацияланиш жараёнларининг алгоритмлари ва сонли ҳисоблаш усуллари» деб номланган учинчи бобида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг математик моделидаги барча тенгламалар скаляр кўринишда ва ўлчовлари билан олинган. Бундай тенгламалардан иборат системани ечиш етарли даражада мураккаб. Шунинг учун уларни ўлчовсиз ҳолга келтириб вектор-матрица кўринишида ечилади. Назарий асосларни ҳисобга олган ҳолда, чекли айирмалар, матрицали ҳайдаш ва кетма-кет яқинлашиш ҳамда кўндаланг кесими мураккаб бўлган стерженлар учун геометрик-механик параметрларини аниқлашда рақамли бинар тасвирларни қайта ишлаш усуллари орқали ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган.

Фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг ҳисоблаш алгоритмининг ишлаб чиқишда (9)-(11) ифодалар ўлчовсиз кўринишда ҳал этилади. Шунинг учун, физик жараёнларда ишлаб чиқилган тамойиллардан, қонуниятлардан ва бошқа усуллардан фойдаланиш ўринли. Юқоридаги (9)-(11) ифодаларни ўлчовсиз кўринишга келтиришда қуйидаги белгилашлардан фойдаланамиз: $W = a\bar{W}$, $U = a\bar{U}$, $V = a\bar{V}$, $x = l\bar{x}$, $y = b_0\bar{y}$, $z = h\bar{z}$, $\mathcal{G} = (1/l)\bar{\mathcal{G}}$, $t = t_0\bar{t}$, вақт $t_0 = l\sqrt{\rho/E}$ муносабатлар бўйича ўлчовсиз микдорларни киритиб, ҳосил бўлган ифодаларни $EF(a^2/l^2)$ га бўлиб юборамиз ва ўлчовсиз ҳолга келтирамиз.

Юқоридаги (9), (10) ва (11) ларнинг ўлчовсиз ҳолга келтирилган ҳолдаги ифодаларининг коэффицентлари скаляр кўринишда бўлганлиги учун тенгламалар системасини вектор-матрица кўринишда ифодалаб оламиз.

Стержень тебранишининг тенгламалар системаси, бошланғич ва чегаравий шартлари вектор-матрица кўриниши қуйидагича:

$$[M] \frac{\partial^2 \vec{U}^k}{\partial \bar{t}^2} + [A] \frac{\partial^2 \vec{U}^k}{\partial \bar{x}^2} + [B] \frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{x}} + [C] \vec{U}^k + \left([\Phi] \frac{\partial \vec{U}^{k-1}}{\partial \bar{x}} \right) \frac{\partial^2 \vec{U}^{k-1}}{\partial \bar{x}^2} + [D] \vec{F}_i = 0, \tag{12}$$

$$[\bar{M}] \left[\frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{t}} t_0 \right] \delta \vec{U}^k \Big|_{\bar{t}} = 0, \tag{13}$$

$$[\bar{B}] \frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{x}} + [\bar{C}] \vec{U}^k + \left([\bar{\Phi}] \frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{x}} \right) \frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{x}} + [\bar{D}] \vec{\bar{F}}_{che} = 0, \quad (14)$$

бу ерда $M, A, B, C, \bar{\Phi}, D, \bar{M}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}, \vec{\bar{F}}$ (12)-(14) тенгламалар тизимидаги коэффициентлардан ҳосил бўлган 9×9 матрицалар, $\vec{\bar{F}}_i, \vec{\bar{F}}_{che}$ - тўққизта скаляр қийматдан ташкил топган ташқи кучлар бажарган ишнинг вектор қийматлари, \vec{U} номаълум коэффициент вектори. Тенгламалар тизимидаги номаълум вектор $\vec{U} = \{W, \alpha_1, \beta_1, V, \alpha_2, \beta_2, U, \theta, \vartheta\}$ кўриниши олинади.

Кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик-механик катталикларни ҳисоблаш бир мунча қийинчиликлар келтириб чиқаради. Шунинг учун, юқоридаги матрица элементларини ҳисоблаш жараёнларини компьютер графикаси имкониятларидан фойдаланиб, ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган.

Ишлаб чиқилган (12)-(14) тенгламалар системасининг номаълумларини топиш учун марказий чекли-айирмаларнинг ошқормас схемаси усулидан фойдаланиб, уч диагоналли тенгламалар тизимига олиб келинган.

Уч диагоналли тенгламалар тизими қуйидагича бўлади:

$$A_1 \vec{U}_{i-1}^{k,j+1} - C_1 \vec{U}_i^{k,j+1} + B_1 \vec{U}_{i+1}^{k,j+1} = \vec{\bar{F}}_i^k. \quad (15)$$

Ҳосил бўлган уч диагоналли (15) тенгламани матрицали ҳайдаш усули билан ечилган:

$$\vec{U}_i^{k,j+1} = \vec{\alpha}_{i+1}^k \vec{U}_{i+1}^{k,j+1} + \vec{\beta}_{i+1}^k.$$

Бу ерда $\vec{\alpha}_{i+1}^k$ ва $\vec{\beta}_{i+1}^k$ номаълум коэффициентлар

$$\vec{\alpha}_{i+1}^k = -\frac{\vec{B}_i}{\vec{A}_i \cdot \vec{\alpha}_i^k - \vec{C}_i}; \quad \vec{\beta}_{i+1}^k = \frac{\vec{\bar{F}}_i - \vec{A}_i \beta_i^k}{\vec{A}_i \cdot \vec{\alpha}_i^k - \vec{C}_i}; \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n-1)$$

формулалар ёрдамида топилади ($i = 1, 2, \dots, n-1$). Бошланғич ва чегаравий

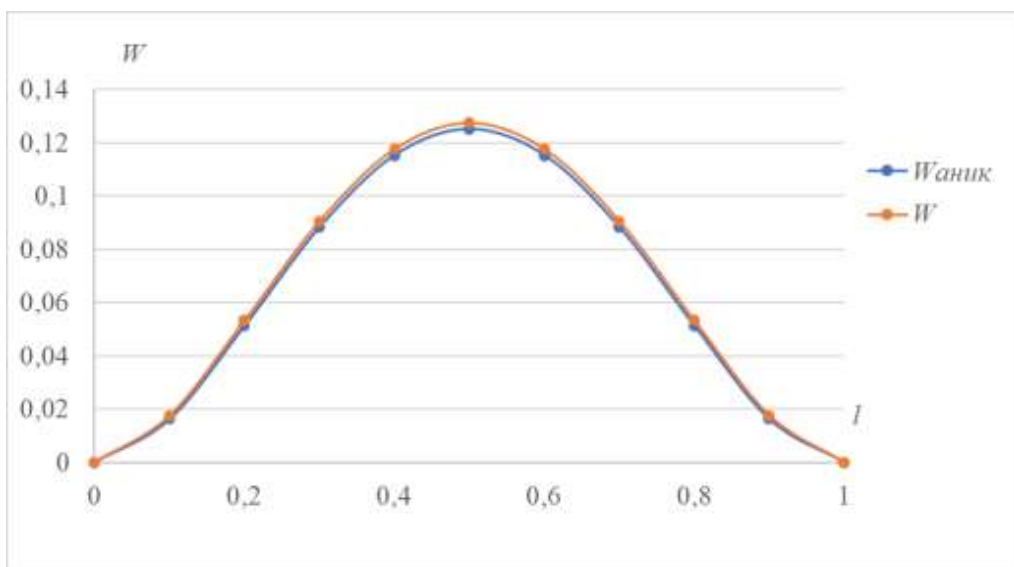
шартлар $\alpha_0 = 0, \beta_0 = 0, u_0^0 = 0, u_n^{j+1} = \frac{\vec{\bar{F}}_i - A_1 \beta_n}{C_n - A_1 \alpha_n}$ кетма-кет яқинлашиш

$|\vec{U}_i^{k,j+1} - \vec{U}_i^{k-1,j+1}| \leq \varepsilon$ шарт асосида натижага эришилган.

Диссертациянинг «**Дастурий мажмуа тавсифи ва олинган натижалар таҳлили**» деб номланган тўртинчи бобида фазовий юкланишлардаги стерженларнинг деформацияланиш жараёнларини аниқлашнинг дастурий мажмуаси тавсифи келтирилган. Ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг деформацияланганлик ҳолатининг турли масалалар асосида олинган сонли ҳисоблаш натижаларини таққослаш орқали таҳлиллар келтирилган.

1 - расмда икки томони маҳкамланган стерженнинг эгилишдаги умумий ечимини эластикликнинг тақрибий ечимига солиштирилган. Ҳисоблаш тажрибаларини қуйидаги геометрик ва механик параметрлар

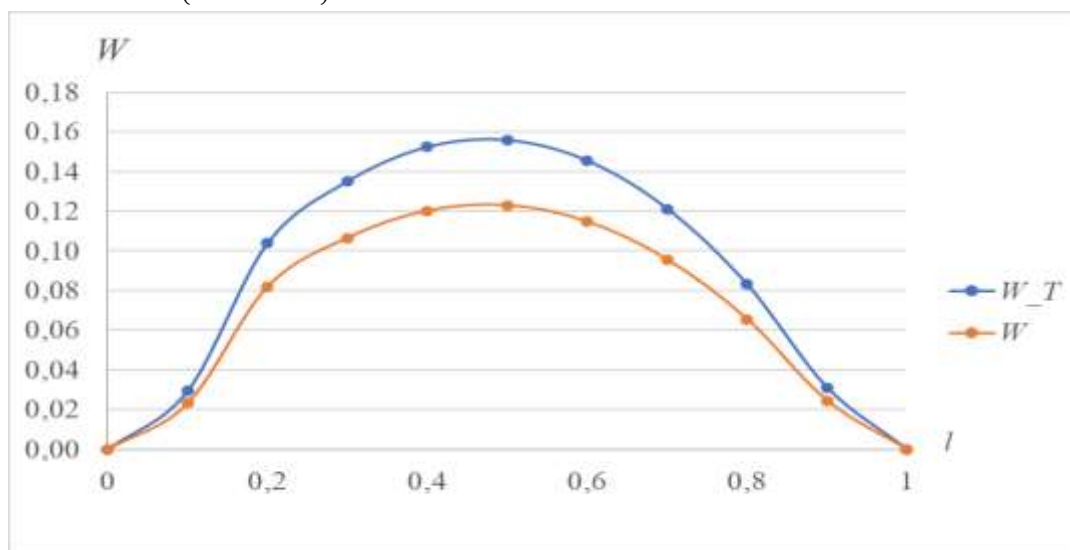
орқали ўтказилган: $l = 2$ м, $q = 50 \text{ Н / см}^2$, $h = 0.1$ м, $b_0 = 0.05$ м
 $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.



1 - расм. Кўндаланг кўчишдаги $W_{аник}$ ва W сонли ечимларни таққослаш графиги

Тажриба натижалари шуни кўрсатадики, максимум кўчишлар 0.002 га фарқи билан яқинлашмоқда.

2 - расмда бўйлама кўчиши U ни ҳисобга олганда XOZ текислигида стерженнинг эгилиши масаласи берилган $u_1 = U(x,t) - z\alpha_1(x,t)$, $u_3 = W(x,t)$. $\vec{U} = \{W, \alpha_1, U\}$.



2 - расм. Кўндаланг кўчиш W нинг стержень узунлиги бўйича тарқалишининг қиёсий таҳлили

Масалада стерженнинг ҳароратини ҳисобга олган ҳолда деформацияланиш ҳолати текширилган, бу ерда W – ҳароратсиз кўчиш, W_T -ҳароратни ҳисобга олган ҳолдаги кўчиш. Стерженнинг геометрик ўлчамлари $a=0.1$ м, $b=0.05$ м, $l=2$ м, механик хусусиятлари: Юнг модули

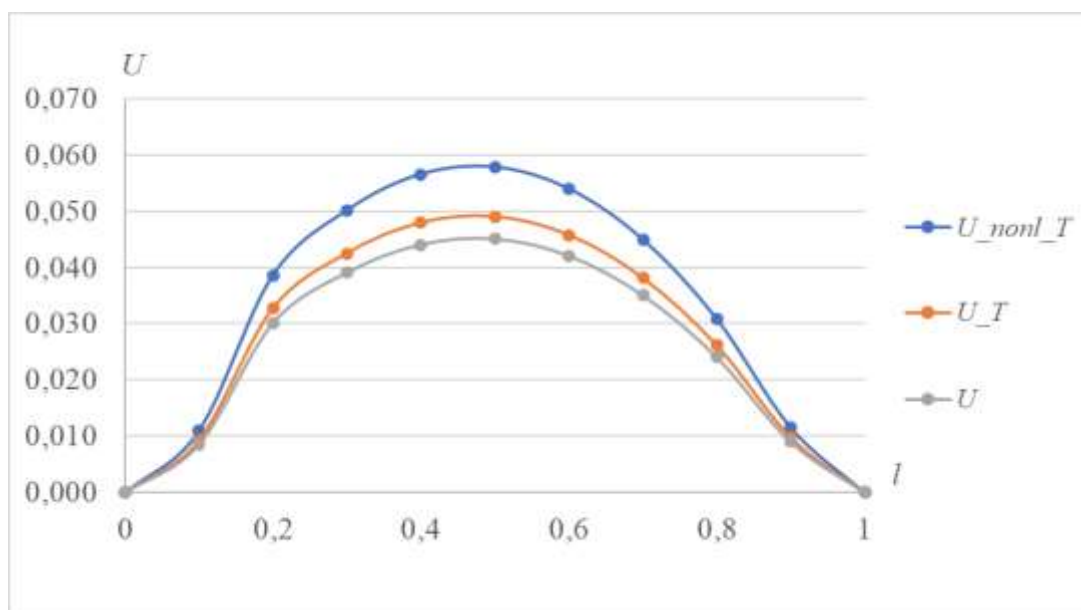
$E = 2 \cdot 10^5$ МПа, Пуассон коэффициенти $\mu = 0.3$, юзаларга таъсир этувчи кучларнинг қийматлари $q_1 = 1 \text{ Н} / \text{см}^2$, $q_3 = 50 \text{ Н} / \text{см}^2$, $M = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ларга тенг деб олинди.

Натижалар таҳлиллари шуни кўрсатадики, ҳароратни ҳисобга олган ҳолдаги қиймати W марказий нуқтасининг кўчиши 18 % гача юқори чиқиши аниқланди.

3 ва 4 - расмларда фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими мураккаб стерженларда бўйлама, кўндаланг ва буровчи кучлар таъсирида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда марказий нуқталарини кўчиши қуйидагича бўлади. Ҳисоблаш тажрибаларини қуйидаги геометрик ва механик параметрлар орқали ўтказилди: $l = 2 \text{ м}$, $q_1 = 1 \text{ Н} / \text{см}^2$, $q_2 = 1 \text{ Н} / \text{см}^2$, $q_3 = 50 \text{ Н} / \text{см}^2$, $h = 0.1 \text{ м}$, $b_0 = 0.05 \text{ м}$ $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ $M = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{см}$.

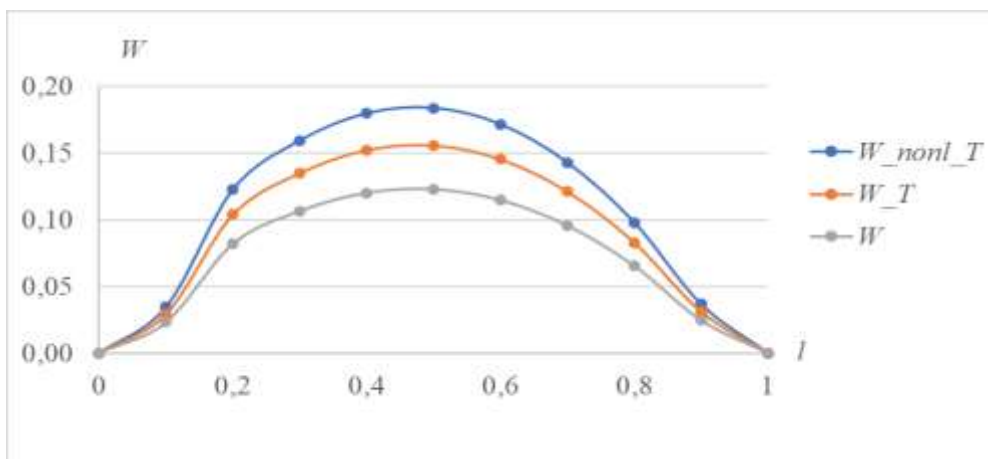
$$\left. \begin{aligned} u_1(x, y, z, t) &= U(x, t) - z\alpha_1(x, t) - y\alpha_2(x, t), \\ u_2(x, y, z, t) &= V(x, t) + z\theta(x, t), \quad u_3(x, y, z, t) = W(x, t) - y\theta(x, t). \end{aligned} \right\}$$

Стерженнинг геометрик ўлчамлари $a = 0.1 \text{ м}$, $b = 0.05 \text{ м}$, $l = 2 \text{ м}$, механик хусусиятлари: Юнг модули $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, Пуассон коэффициенти $\mu = 0.3$, юзаларга таъсир этувчи кучларни қийматлари $q_1 = 1 \text{ Н} / \text{см}^2$, $q_2 = 1 \text{ Н} / \text{см}^2$, $q_3 = 50 \text{ Н} / \text{см}^2$, $M = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ларга тенг деб олинди.



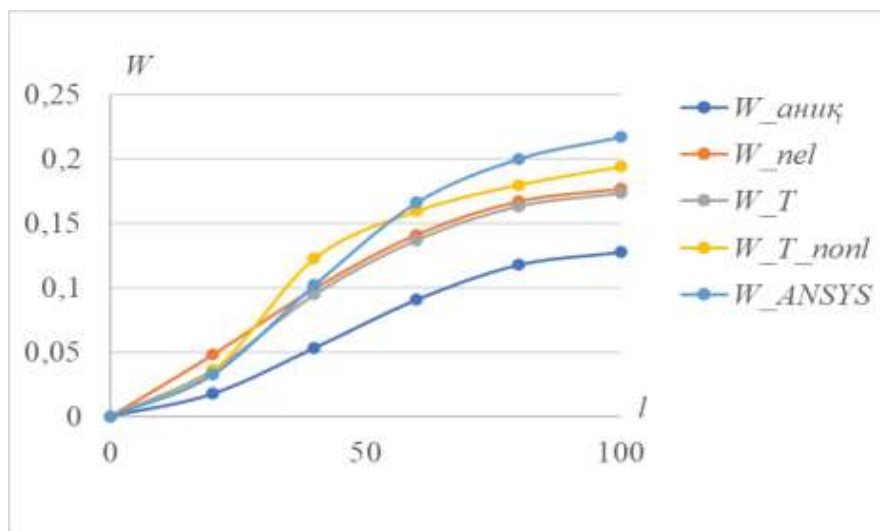
3 - расм. Бўйлама кўчиш U нинг стержень узунлиги бўйича тарқалишининг қиёсий таҳлили

3 - расмдаги қўйилган масала юзасидан бўйлама кўчиш U нинг қиёсий таҳлилидан нозичиқли натижалари чизиқли натижаларидан фарқли равишда қаралаётган масалада 15,2 %, ҳароратсиз кўчишидан эса 22.1 % ни ташкил этди. Бу ерда U_nonl_T - нозичиқли ва ҳароратни ҳисобга олган ҳолда бўйлама кўчиши, U_T - ҳароратни ҳисобга олган ҳолда бўйлама кўчиши.



4 - расм. Кўндаланг кўчиш W нинг стержень узунлиги бўйича ҳароратни ҳисобга олганда қиёсий таҳлили

4 - расмда келтирилган қиёсий натижалар таҳлилидан ночизикли W_{nonl_T} натижа ва W_T чизикли натижа орасидаги фарқ 15,25 % ни ташкил этди.



5 - расм. Икки томони маҳкамланган стерженга ташқи кучлар таъсирида кўндаланг кўчиш W нинг солиштирма таҳлили

Ушбу 5 - расмдаги графикда $W_{аниқ}$, W_{T_nonl} - ҳароратни ва ночизиклиликни ҳисобга олган ҳолдаги сонли натижалар, W_T - чизикли ҳароратни ҳисобга олган ҳолдаги, W_{ANSYS} амалий дастурлар пакетида олинган сонли натижалари келтирилган. W_{T_nonl} сонли ечимини бошқа ечимларга нисбатан солиштирсак, $W_{аниқ}$ ечимга нисбатан 0.1 мм га, W_T га нисбатан 0.02 мм га, W_{ANSYS} да олинган сонли натижага нисбатан -0.023 мм га фарқ қилиниши келиб чиқди.

Сонли тажриба натижалари шуни кўрсатадики, юкланишларда ҳароратнинг ортиши билан стерженнинг кўчиши ортиб бормоқда, бу эса ўз навбатида стерженнинг деформацияланиш ҳолатини асосли ҳолатда тадқиқ этишга имкон яратади.

ХУЛОСА

«Ҳароратни ҳисобга олган ҳолда фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизикли жараёнларини математик моделлаштириш» мавзусидаги диссертация бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг ҳароратини ҳисобга олган ҳолда Остроградский-Гамильтон вариацион тамойили ва В.Қ.Қобуловнинг аниқлаштирилган назарияси асосида геометрик ночизикли масалалари учун математик моделлар такомиллаштирилди. Мазкур моделлар бўйлама, кўндаланг ва буровчи кучларнинг биргаликдаги таъсирини ҳисобга олган ҳолда стерженларнинг ночизикли деформацияланиш жараёнларини тўла ифодалашга хизмат қилди.

2. Кўндаланг кесими ихтиёрий бўлган, фазовий юкланишлардаги стерженлар ҳароратини ҳисобга олган ҳолда бўйлама, кўндаланг эгилиш ва кўндаланг буралишдаги стерженларнинг статик ва динамик ҳамда геометрик ночизикли масалаларини ечиш учун такомиллаштирилган математик модель табиий бошланғич ва чегаравий шартлари билан ишлаб чиқилди. Мазкур модель кўндаланг кесими ихтиёрий бўлган стерженларнинг деформацияланиш ҳолатини тадқиқи учун хизмат қилди.

3. Кўндаланг кесими ихтиёрий бўлган стерженларнинг геометрик ва механик параметрларини аниқлашда рақамли бинар тасвирларни қайта ишлаш усули орқали сонли ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди. Мазкур алгоритм мураккаб конфигурацияли стерженларнинг деформацияланишини аниқлашга имкон берди.

4. Марказий чекли айирмалар, матрицали хайдаш ва кетма-кет яқинлашиш усуллари асосида фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизикли масалалари ҳароратни ҳисобга олган ҳолда сонли ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди. Ишлаб чиқилган алгоритмлар асосида тест масалалари ечилди. Олинган натижалар ишончлилик ва аниқладик критерияларини баҳолашга имкон берди.

5. Фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг геометрик ночизикли масалалари ҳароратни ҳисобга олган ҳолда деформацияланиш ҳолатини аниқлаш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилди. Ушбу дастурий мажмуа бўйлама, кўндаланг ва буровчи кучларнинг биргаликдаги таъсирида стерженларнинг геометрик ночизикли масалаларида ҳароратни ҳисобга олган ҳолда деформацион жараёнларни тадқиқи учун хизмат қилди.

6. Ишлаб чиқилган математик моделлар ва дастурий таъминотлар қуйидаги объектларга жорий этилган: «SARDOR LOYIHA DIZAYN SERVIS» ва «ZAMONAVIY LOYIHA XIZMATI» ҳамда «PROEKT-SERVIS» МЧЖларда илмий-тадқиқот натижалари, оптимал ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий мажмуани қўллаш натижасида қурилиш-монтаж ишларининг лойиҳалаш жараёнларида вақт сарфини 2 марта камайиши ҳисобига умумий иш унумдорлиги 8-10% га оширишга ҳамда ҳисоблаш аниқлигининг ортиши ҳисобига материал сарф-харажатларини 5-10% га камайишига имкон берди.

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

НАМАНГАНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

ИСМОИЛОВ ШОХИМАРДОН МУХАММАДЖОНОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ
НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО
НАГРУЖЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ**

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 B2021.4.PhD/T2085.

Диссертация выполнена в Наманганском инженерно-строительном институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.tuit.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель: Анарова Шахзода Аманбаевна
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Назирова Элмира Шодмоновна
доктор технических наук, доцент
Файзиев Бекзоджон Муртазаевич
доктор философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ведущая организация: Ташкентский государственный транспортный университет

Защита диссертации состоится «17» декабря 2021 г. в 14⁰⁰ 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. 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 № 2676). (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (+99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «9» декабре 2021 года.

(протокол рассылки № 40 от «02» декабре 2021 г.).



Р.Х. Хамдамов

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

Ф.М. Нуралиев

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

Ш.А. Садуллаева

Председатель научного семинара
при научном совете
по присуждению ученых степеней,
доктор физико-математических наук, доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире особое внимание уделяется разработке новых и совершенствованию существующих программных комплексов для определения напряженно-деформированного состояния материалов, используемых при проектировании зданий и сооружений. В связи с этим, разработка и усовершенствование математических моделей, эффективных численных алгоритмов и пакетов программ для исследования нелинейных процессов деформирования стержней при произвольных и пространственных нагрузках с учетом температуры остается одной из актуальных проблем на сегодняшний день. В развитых странах мира, в частности, в США, Германии, Китае, Австралии, Саудовской Аравии, Канаде, Франции, Японии, ОАЭ, Иране, Египте, Российской Федерации, Украине, Казахстане и других странах, осуществляется активная разработка усовершенствованных математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных комплексов для исследования деформационных процессов с учетом температуры и геометрической нелинейности стержней при пространственных нагрузках.

Во всем мире ведутся научные исследования по построению усовершенствованных математических моделей геометрически нелинейных процессов деформирования стержней под действием пространственных нагрузок с учетом температуры, а также по разработке программных комплексов на основе численных алгоритмов решения задач. Одной из важных задач при этом является дальнейшее усовершенствование математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных комплексов для определения напряженно-деформированных состояний, включая растяжение, сжатие, изгиб, продольной изгиб и продольное кручение стержней в условиях пространственного нагружения с учетом температуры. Вместе с тем, предметом научного интереса являются вопросы разработки математических моделей и численных алгоритмов решения задач геометрических нелинейных процессов деформирования стержней с произвольным поперечным сечением при пространственных нагрузках.

В Республике, по данным Государственного комитета статистики, за первые шесть месяцев 2021 года 1172 малых предприятия металлургической промышленности произвели продукцию на 45,0 млрд. сум. Эти металлоконструкции широко используются в современной архитектуре, строительстве, градостроительстве, машиностроении, геологии, производстве и в других отраслях. Поэтому проектирование стержневых металлических конструкций предваряется проведением большой работы, связанной с развитием методов математического моделирования деформационных процессов с целью детального изучения и обнаружения напряженно-деформированных состояний с использованием современных информационных технологий. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах определен ряд задач, в

частности, «...развитие и модернизация дорожно-транспортной, инженерно-коммуникационной и социальной инфраструктур, ...внедрение информационно-коммуникационных технологий в экономику социальную сферу, систему управления ...»². Одной из важных задач является разработка автоматизированных систем определения геометрически нелинейных процессов пространственного нагружения стержней с учетом температуры.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года №УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениями Президента Республики Узбекистан от 20 сентября 2019 года №ПП-4464 «О мерах по широкому внедрению информационно-коммуникационных технологий в сферу строительства», от 13 марта 2020 года №ПП-5963 «О дополнительных мерах по углублению реформ в строительной отрасли Республики Узбекистан», №ПП-4986 от 10 февраля 2021 года «О мерах по привлечению инвестиций в дальнейшее развитие информационных технологий и коммуникаций» и другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Информатизация и развитие информационно-коммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. В работах многих ученых, посвященных фундаментальным основам термоупругости, отмечается, что процесс деформации представляет собой термодинамический процесс. К зарубежным ученым, которые занимались вопросами решения проблем деформации в рамках теории нелинейной упругости, относятся В. Новацкий, Л.М.Зубов, А.И.Лурье, В.В.Новожилов, Л.Хаджиева, F.S.Bayones, A.M.Abd-Alla, R.Ghaffari, R.Sauer, Y.Y.Zhu, Y.Li, C.J.Cheng, D.Erdenebata, D.Waldmanna, F.Scherbauma, N.Teferleb, Y.Xia, Z.Ding, F.Kangsheng, W.Deng, J.Li, L.Zhongrong, M.R.Eslami, A.Y.Al-Ali, K.H.Almutairi, E.K.Rawy и др.

В Республике рядом ученых проведены исследования по совершенствованию теоретических основ моделирования стержневых структур и развитию вычислительных методов. К их числу относится академик В.К.Кабулов, который разработал теорию линейных и нелинейных процессов деформирования элементов конструкций на основе принципа Остроградского-Гамильтона и предложил алгоритмические подходы к решению практических задач. Научные изыскания академика В.К.Кабулова в дальнейшем были продолжены и получили развитие в работах таких отечественных ученых как Т.Буриев, Б.Курманбаев, Т.Юлдашев,

² Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

Ш.А.Назирова, Б.Мардонов, А.А.Халджигитов, Р.Ш.Индиаминов, Ш.А.Анарова, Ф.М.Нуралиев и их учеников.

Анализ научных работ указанных авторов показывает, что в настоящее время проблема математического моделирования статических и динамических, геометрических нелинейных процессов напряженно-деформированного состояния произвольных стержней при пространственных нагрузках с учетом температуры по-прежнему является актуальной и недостаточно изученной.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование реализовано в рамках проектов Наманганского инженерно-строительного института и Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева по темам № Т-ОТ-2021-175 «Проектирование малогабаритного картофелекопателя для фермерских и дехканских хозяйств» (2021), № ФА-Ф-4-006 «Сейсמודинамика плоско и пространственно расположенных подземных трубопроводных систем при произвольном угле атаки воздействия» (2019-2020) и №ФА-Атех-2018-67 «Оценка реакций подземных трубопроводов на действие набора реальных записей землетрясений и их внедрение» (2019-2020).

Цель исследования состоит в усовершенствовании математической модели геометрически нелинейных процессов пространственного нагружения стержней с произвольным поперечным сечением под воздействием статических и динамических сил и при учете температуры, разработке структуры вычислительных алгоритмов и программного комплекса.

Задачи исследования:

усовершенствование математической модели геометрически нелинейных процессов пространственного нагружения стержней с учетом температуры на основе уточненных теорий В.К. Кабулова, теории упругости и принципа вариации Остроградского-Гамильтона;

разработка алгоритма численного расчета геометрических и механических параметров стержней поперечного сечения на основе метода обработки цифровых бинарных изображений;

разработка алгоритмов численного решения геометрически нелинейных задач для стержней произвольного сечения при пространственном нагружении с учетом температуры;

разработка программного комплекса для решения геометрически нелинейных краевых задач для стержней произвольного сечения при пространственных нагрузках с использованием комбинации методов конечных разностей и матричной прогонки.

Объектом исследования являются процессы напряженно-деформированного состояния с учетом геометрических нелинейных свойств

стержней произвольного сечения и температуры при пространственном нагружении.

Предметом исследования являются математические модели, численные вычислительные алгоритмы и программное обеспечение для исследования геометрически нелинейных процессов пространственного нагружения стержней произвольного сечения с учетом температуры.

Методы исследования. В ходе диссертационного исследования были использованы методы механики деформируемого твердого тела, вариационной вычислительной математики, методы математического моделирования и вычислительного эксперимента, теории алгоритмизации, цифровой обработки двоичных изображений, методы расчета геометрических и механических величин стержней сложной конфигурации, а также современные технологии объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

усовершенствована математическая модель геометрически нелинейных процессов деформации стержней при пространственном нагружении с учетом температуры на основе уточненных теорий В.К. Кабулова, теории упругости и принципа вариации Остроградского-Гамильтона;

разработан вычислительный алгоритм решения статических и динамических, геометрически нелинейных задач для стержней при пространственном нагружении с учетом температуры на основе методов конечных разностей, матричной прогонки, обработки цифровых двоичных изображений и последовательной аппроксимации;

разработаны алгоритмы численного расчета геометрически нелинейных краевых задач для стержней произвольного поперечного сечения при пространственной нагрузке с учетом температуры;

разработана структура программного комплекса для решения геометрически нелинейных задач для стержней произвольного сечения при пространственных нагрузках с использованием комбинации методов конечных разностей и матричной прогонки.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

усовершенствована математическая модель для исследования случаев геометрически нелинейного деформирования стержней при пространственном нагружении с учетом температуры;

разработан вычислительный алгоритм решения статических и динамических, геометрически нелинейных задач для стержней при пространственном нагружении с учетом температуры на основе методов конечных разностей, матричной прогонки, обработки цифровых двоичных изображений и последовательной аппроксимации;

разработан программный комплекс на основе предложенных моделей и алгоритмов, позволяющий проводить вычислительные эксперименты по краевым задачам для стержней при пространственном нагружении с учетом температуры;

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования обосновывается математической постановкой задачи и устойчивостью вариационного принципа Остроградского-Гамильтона, использованного для ее решения, сходимостью схем численного решения задач расчета стержней произвольного поперечного сечения при пространственном нагружении с учетом температуры и устойчивостью вычислительных алгоритмов, а также соответствием результатов численных расчетов точным аналитическим решениям.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в усовершенствовании обобщенных математических моделей стержней на основе принципа Остроградского-Гамильтона с учетом температуры в процессах геометрического нелинейного деформирования при пространственных нагрузках, а также в разработке вычислительных алгоритмов, сочетающих методы конечных разностей, матричной прогонки и последовательных приближений, реализация которых в рамках программного комплекса, позволяет решать задачи исследования напряженно-деформированного состояния стержней произвольного сечения при пространственном нагружении.

Практическая значимость результатов исследования обосновывается возможностью снижения затрат сырья, труда и времени при проведении проектных расчетов конструкций стержневого типа со стержнями произвольного сечения при их пространственном нагружении, повышением качества выполняемых работ и производительности труда, а также эффективной организацией процессов проектирования, применением на практике усовершенствованных математических моделей и вычислительных алгоритмов процессов геометрически нелинейного деформирования при пространственных нагрузках с учетом трудно измеряемой температуры.

Внедрение результатов исследования. На основе применения усовершенствованных математических моделей, алгоритмов и программного комплекса для исследования геометрически нелинейных процессов пространственного нагружения произвольных стержней поперечного сечения при пространственном нагружении с учетом температуры:

разработанный программный комплекс для виртуального проведения вычислительных экспериментов на основе методов конечных разностей и матричной прогонки по решению статических и динамических геометрически нелинейных задач для стержней при пространственном нагружении с учетом температуры внедрен в ООО «SARDOR LOYINA DIZAYN SERVIS» и ООО «ZAMONAVIY LOYINA XIZMATI» (справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций от 29 октября 2021 года №33-8/7687). В результате обеспечена возможность повышения производительности труда на 8-10% за счет сокращения времени проектирования строительно-монтажных работ и снижения материальных затрат на 5-10% за счет повышения точности расчетов;

программный комплекс, разработанный на основе вычислительного алгоритма, для решения статических и динамических задач вместе с методами цифровой обработки бинарных изображений, конечно-разностной матричной прогонки при определении геометрических нелинейных процессов деформации произвольного стержней поперечного сечения с учетом температуры внедрен в ООО «ПРОЕКТ-СЕРВИС» (справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций от 29 октября 2021 года №33-8/7687). В результате обеспечена возможность повышения производительности труда на 10-15% за счет сокращения временных затрат и сокращения материальных затрат в 1,2 раза за счет повышения точности расчетов.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 7 международных и 11 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме исследования опубликованы 32 научные статьи, в том числе 11 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе, 3 в зарубежных и 8 в республиканских журналах, а также получены 3 свидетельства об официальной регистрации программных комплексов для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 118 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

Первая глава диссертации «**Обзор литературы по математическому моделированию деформирования стержней**» посвящена анализу научных исследований, направленных на усовершенствование математических моделей линейного и геометрически нелинейного деформирования стержней при пространственном нагружении с учетом температуры. Кроме того, рассмотрено математическое представление процессов геометрически нелинейного деформирования стержней при пространственном нагружении с учетом температуры.

В.К. Кабулов, разработавший теорию линейных процессов деформирования элементов конструкций, отмечал, что деформирование тела представляет собой термодинамический процесс.

Вариационный принцип Остроградского-Гамильтона записывается следующим образом:

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

где K , Π^T - кинетическая и потенциальная энергии; A - работа внешних сил.

На основе уточненной теории Власова-Джанелидзе-Кабулова перемещение точек стержня при пространственном нагружении под совместным действием продольных, поперечных и крутильных сил представлено в виде

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, y, z, t) &= U(x, t) - z\alpha_1(x, t) - y\alpha_2(x, t) + \varphi(y, z)\mathcal{G}(x, t) + \\ &+ a_1\beta_1(x, t) + a_2\beta_2(x, t), \\ u_2(x, y, z, t) &= V(x, t) + z\theta(x, t), \quad u_3(x, y, z, t) = W(x, t) - y\theta(x, t). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где u_1, u_2, u_3 - компоненты вектора перемещений; U, V, W - перемещения срединной линии стержня; α_1, α_2 - углы поворота сечений при чистом изгибе; β_1, β_2 - углы поперечного сдвига; θ - угол закручивания; $\mathcal{G}(x, t)$ - угол кручения по длине стержня; $a_1(y, z), a_2(y, z)$ - заданные функции; $\varphi(x, t)$ - функция кручения Сен-Венана.

Расчет формулы нелинейной деформации согласно соотношению Коши выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

где u - вектор, представляющий перемещение центральной точки тела.

При повышении температуры элементы тела расширяются. В твердом теле такое расширение обычно не проходит свободно и деформации возникают из-за напряжения. При применении обратной формы закона Гука трехмерные уравнения связи с учетом температуры напряженно-деформированного состояния стержней выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} - \alpha\Gamma &= \frac{1}{E} (\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33})); \quad \varepsilon_{22} - \alpha\Gamma = \frac{1}{E} (\sigma_{22} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{33})); \\ \varepsilon_{33} - \alpha\Gamma &= \frac{1}{E} (\sigma_{33} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{22})); \quad \gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G}; \quad \gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G}; \quad \gamma_{13} = \frac{\tau_{13}}{G}, \end{aligned} \quad (4)$$

где с учетом поперечного напряжения, происходящего в стержнях, из выражения (4) $\sigma_{22} = 0, \sigma_{33} = 0, \sigma_{31} = 0$ согласно гипотезе Бернулли, а напряжение, зависимое от температуры, вычисляется по следующей формуле:

$$\sigma_{11}^T = \sigma_{11} + E\alpha\Gamma, \quad (5)$$

где α - коэффициент линейного расширения; T - температура; E - модуль упругости, μ - коэффициент Пуассона, σ_{11}^T - температурное напряжение; σ_{11} - нетемпературное напряжение.

Очевидно, что температуру целесообразно учитывать в задаче определения геометрически нелинейных процессов деформирования стержня при пространственном нагружении.

Основываясь на изложенных выше теориях, важно усовершенствовать математическую модель геометрически нелинейных процессов деформирования в произвольных стержнях поперечного сечения при пространственном нагружении с учетом температуры.

Во второй главе диссертации «**Математическая модель температуры в процессах деформирования стержней**» получены уравнения геометрически нелинейных деформационных процессов, колебания стержней при пространственном нагружении с использованием уточненной теории Власова-Джанелидзе-Кабулова на основе принципа Остроградского-Гамильтона. Установлена связь между тензорами деформации стержней при разработке математической модели. Используя теорию упругости, второй порядок представляется системой из девяти геометрических нелинейных дифференциальных уравнений с естественными начальными и граничными условиями второго порядка. Все осуществленные работы направлены на усовершенствование математической модели геометрически нелинейного деформирования стержней.

В стержнях при пространственном нагружении под воздействием внешних сил образуется кинетическая энергия. Согласно выражению (1) общий вид кинетической энергии в уравнении равновесия имеет вид:

$$\int \int_{t \ v} \delta K dv dt = \frac{1}{2} \rho \int_t \int_v \delta \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} u_i \right] dv dt. \quad (6)$$

Мы используем выражение (2) для развития изменения кинетической энергии.

Общий вид потенциальной энергии следующий:

$$\int \int_{t \ v} \Pi^T dv dt = \int \int_{t \ v} \sigma_{ij}^T \delta \varepsilon_{ij} dv dt. \quad (7)$$

Вставляя выражения (2) и (3) в выражение (7) и выполняя варьирование, интегрирование, дифференцирование и приведя подобные члены, вычисляем вариации потенциальной энергии.

Формула расчета работы внешних сил в произвольном стержне с поперечным сечением при пространственных нагрузках представлена следующим образом:

$$\int \int_{t \ v} \delta A dt = \int \int_{t \ v} \sum_{i=1}^3 P_i \delta u_i dv dt + \int \int_{t \ s} \sum_{i=1}^3 q_i \delta u_i ds dt + \int \int_{t \ s_1} \sum_{i=1}^3 f_i \delta u_i ds_1 dt, \quad (8)$$

где F_i - составляющие объемных сил, q_i - составляющие поверхностных сил, действующих на поверхность; f_i - составляющие сил, которые действуют на края.

Сопоставляя работу, совершаемую кинетической (6), потенциальной (7) энергиями и внешними силами (8) произвольных стержней в пространственных нагрузках с уравнением равновесия (1), формируем обобщенную математическую модель с учетом температуры в геометрически чувствительных процессах деформации.

Система обобщенных уравнений чувствительных процессов деформации стержней при пространственных нагрузках с учетом температуры имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
& -\rho F \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \rho S_y \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + \rho S_z \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} - \rho S_\varphi \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} - \rho S_{a_1} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} - \\
& - \rho S_{a_2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} + \frac{\partial N_x^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_u}{\partial x} + (\bar{P}_1 + \bar{q}_1) = 0; \\
& \rho S_y \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \rho I_y \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} - \rho I_{zy} \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} + \rho I_{z\varphi} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} + \rho I_{za_1} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} + \\
& + \rho I_{za_2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} - \frac{\partial M_y^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{a_1}}{\partial x} + Q_{xz} - (M_y^{\bar{P}_1} + M_y^{\bar{q}_1}) = 0; \\
& -\rho S_{a_1} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \rho I_{a_1z} \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + \rho I_{ya_1} \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} - \rho I_{a_1\varphi} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} - \rho I_{a_1^2} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} - \rho I_{a_1a_2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} + \\
& + \frac{\partial M_{a_1}^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{\beta_1}}{\partial x} - Q_{a_1} + (M_{a_1}^{P_1} + M_{a_1}^{q_1}) = 0; \tag{9} \\
& -\rho F \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} - \rho S_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{\partial Q_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_v}{\partial x} + (\bar{P}_2 + \bar{q}_2) = 0; \\
& \rho S_z \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \rho I_{yz} \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} - \rho I_z \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} + \rho I_{y\varphi} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} + \rho I_{ya_1} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} + \\
& + \rho I_{ya_2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} - \frac{\partial M_z^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{a_2}}{\partial x} + Q_{xy} - (M_z^{P_1} + M_z^{q_1}) = 0; \\
& -\rho S_{a_2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \rho I_{a_2z} \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + \rho I_{ya_2} \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} - \rho I_{a_2\varphi} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} - \rho I_{a_1a_2} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} - \\
& - \rho I_{a_2^2} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} + \frac{\partial M_{a_2}^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_{\beta_2}}{\partial x} - Q_{a_2} + (M_{a_2}^{P_1} + M_{a_2}^{q_1}) = 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\rho F \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \rho S_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{\partial Q_{13}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_w}{\partial x} + (\bar{P}_3 + \bar{q}_3) = 0; \\
& -\rho S_y \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \rho S_z \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - \rho I_\rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_\theta}{\partial x} + (M_x^{P_{23}} + M_x^{q_{23}}) = 0; \\
& -\rho S_\varphi \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \rho I_{\varphi z} \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial t^2} + \rho I_{y\varphi} \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial t^2} - \rho I_\varphi \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial t^2} - \rho I_{a_1\varphi} \frac{\partial^2 \beta_1}{\partial t^2} - \\
& -\rho I_{a_2\varphi} \frac{\partial^2 \beta_2}{\partial t^2} + \frac{\partial M_\varphi^T}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_\mathcal{G}}{\partial x} - M_\varphi + (M_\varphi^{P_1} + M_\varphi^{q_1}) = 0.
\end{aligned}$$

Обобщенные естественные начальные условия следующие:

$$\begin{aligned}
& \rho \left[F \frac{\partial U}{\partial t} - S_y \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} - S_z \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + S_\varphi \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + S_{a_1} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} + S_{a_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta U \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[-S_y \frac{\partial U}{\partial t} + I_y \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + I_{zy} \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} - I_\varphi \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} - I_{a_1} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} - I_{a_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \alpha_1 \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[S_{a_1} \frac{\partial U}{\partial t} - I_{za_1} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} - I_{ya_1} \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + I_{\varphi a_1} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + I_{a_1^2} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} + I_{a_1 a_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \beta_1 \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[F \frac{\partial V}{\partial t} + S_y \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \delta V \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[-S_z \frac{\partial U}{\partial t} + I_{zy} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + I_z \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} - I_{y\varphi} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} - I_{ya_1} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} - I_{ya_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \alpha_2 \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[S_{a_2} \frac{\partial U}{\partial t} - I_{za_2} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} - I_{ya_2} \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + I_{\varphi a_2} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + I_{a_1 a_2} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} + I_{a_2^2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \beta_2 \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[F \frac{\partial W}{\partial t} - S_z \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \delta W \Big|_t = 0; \quad \rho \left[S_y \frac{\partial V}{\partial t} - S_z \frac{\partial W}{\partial t} + I_\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \delta \theta \Big|_t = 0; \\
& \rho \left[S_\varphi \frac{\partial U}{\partial t} - I_{z\varphi} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} - I_{y\varphi} \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + I_\varphi \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + I_{\varphi a_1} \frac{\partial \beta_1}{\partial t} + I_{\varphi a_2} \frac{\partial \beta_2}{\partial t} \right] \delta \mathcal{G} \Big|_t = 0.
\end{aligned} \tag{10}$$

Естественные граничные условия следующие:

$$\begin{aligned}
& \left[-(N_x^T + \Psi_u) + \bar{f}_1 \right] \delta U \Big|_x = 0; \quad \left[-(M_y^T + \Psi_{\alpha_1}) + M_y^{f_1} \right] \delta \alpha_1 \Big|_x = 0; \\
& \left[-(M_{a_1}^T + \Psi_{\beta_1}) + M_{a_1}^{f_1} \right] \delta \beta_1 \Big|_x = 0; \\
& \left[-(Q_{xy} + \Psi_v) + f_2 \right] \delta V \Big|_x = 0; \quad \left[-(M_z^T + \Psi_{\alpha_2}) + M_z^{f_1} \right] \delta \alpha_2 \Big|_x = 0; \\
& \left[-(M_{\beta_2}^T + \Psi_{\beta_2}) + M_{a_2}^{f_1} \right] \delta \beta_2 \Big|_x = 0; \quad \left[-(Q_{xz} + \Psi_w) + \bar{f}_3 \right] \delta W \Big|_x = 0;
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\left[-(M_x + \Psi_\theta) + M_\varphi^{f_1} \right] \delta\theta \Big|_x = 0; \quad \left[-(M_\varphi^T + \Psi_g) + M_x^{f_{23}} \right] \delta g \Big|_x = 0.$$

В третьей главе диссертации «Алгоритмы процессов деформирования и численные методы расчета» все уравнения разработанной математической модели стержней при пространственном нагружении с учетом температуры получены в скалярной форме. Решение системы таких уравнений достаточно сложно. Поэтому они решаются в виде вектор-матрицы, для чего приводим их к безразмерному виду. С учетом теоретических основ был разработан вычислительный алгоритм с использованием методов цифровой обработки бинарных изображений для определения геометрико-механических параметров стержней со сложным поперечным сечением с использованием методов конечных разностей, матричной прогонки и последовательных приближений.

В рамках разработанного алгоритма расчета произвольных стержней поперечного сечения при пространственном нагружении, выражения (9) - (11) решаются в безразмерном виде. Поэтому целесообразно использовать принципы, законы и другие методы, разработанные в физических процессах. Вводя безразмерные величины в отношения $W = a\bar{W}$, $U = a\bar{U}$, $V = a\bar{V}$, $x = l\bar{x}$, $y = b_0\bar{y}$, $z = h\bar{z}$, $\mathcal{G} = (1/l)\bar{\mathcal{G}}$, $t = t_0\bar{t}$, временных отношений $t_0 = l\sqrt{\rho/E}$, делим полученные выражения на $EF(a^2/l^2)$ и переходим к безразмерным величинам.

Поскольку здесь выражения (9), (10) и (11) представлены в скалярной форме, мы можем выразить систему уравнений в векторно-матричной форме.

Система уравнений колебаний стержней, начальные и граничные условия выражаются в виде вектор-матрицы следующим образом:

$$[M] \frac{\partial^2 \vec{U}^k}{\partial \bar{t}^2} + [A] \frac{\partial^2 \vec{U}^k}{\partial \bar{x}^2} + [B] \frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{x}} + [C] \vec{U}^k + \left([\bar{\Phi}] \frac{\partial \vec{U}^{k-1}}{\partial \bar{x}} \right) \frac{\partial^2 \vec{U}^{k-1}}{\partial \bar{x}^2} + [D] \vec{\bar{F}}_i = 0, \quad (12)$$

$$[\bar{M}] \left[\frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{t}} t_0 \right] \delta \vec{U}^k \Big|_{\bar{t}} = 0, \quad (13)$$

$$[\bar{B}] \frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{x}} + [\bar{C}] \vec{U}^k + \left([\bar{\bar{\Phi}}] \frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{x}} \right) \frac{\partial \vec{U}^k}{\partial \bar{x}} + [\bar{D}] \vec{\bar{F}}_{che} = 0. \quad (14)$$

где $M, A, B, C, \bar{\Phi}, D, \bar{M}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}, \bar{\bar{\Phi}}$ - матрицы 9×9 , сформированные из коэффициентов системы уравнений (12)-(14), $\vec{\bar{F}}_i, \vec{\bar{F}}_{che}$ - это векторные значения работы внешних сил, состоящие из девяти скалярных значений; \vec{U} - неизвестный вектор коэффициентов. Неизвестный вектор в системе уравнений имеет вид: $\vec{U} = \{W, \alpha_1, \beta_1, V, \alpha_2, \beta_2, U, \theta, \mathcal{G}\}$.

Расчет геометрически-механических параметров произвольных стержней с поперечным сечением достаточно сложен. Поэтому был разработан вычислительный алгоритм, использующий возможности

компьютерной графики для вычисления вышеуказанных матричных элементов.

Система трехдиагональных уравнений выглядит следующим образом:

$$A_1 \vec{U}_{i-1}^{k+1,j+1} - C_1 \vec{U}_i^{k+1,j+1} + B_1 \vec{U}_{i+1}^{k+1,j+1} = \vec{F}_i^{k+1}. \quad (15)$$

Решаем получившееся трехдиагональное (15) уравнение методом матричной прогонки:

$$\vec{U}_i^{k,j+1} = \vec{\alpha}_{i+1}^k \vec{U}_{i+1}^{k,j+1} + \vec{\beta}_{i+1}^k.$$

Здесь $\vec{\alpha}_{i+1}^k$ и $\vec{\beta}_{i+1}^k$ - неизвестные коэффициенты, определяемые по формулам ($i = 1, 2, \dots, n-1$):

$$\vec{\alpha}_{i+1}^k = -\frac{\tilde{B}_i}{\tilde{A}_i \cdot \vec{\alpha}_i^k - \tilde{C}_i}; \quad \vec{\beta}_{i+1}^k = \frac{\tilde{F}_i - \tilde{A}_i \beta_i^k}{\tilde{A}_i \cdot \vec{\alpha}_i^k - \tilde{C}_i}; \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n-1).$$

Начальные и граничные условия определяются в виде: $\alpha_0 = 0$, $\beta_0 = 0$,

$$u_0^0 = 0, \quad u_n^{j+1} = \frac{\tilde{F}_i - A_1 \beta_n}{C_n - A_1 \alpha_n}.$$

Условие последовательной аппроксимации итерационного процесса имеет следующий вид $|\vec{U}_i^{k,j+1} - \vec{U}_i^{k-1,j+1}| \leq \varepsilon$.

В четвертой главе диссертации «**Описание программного комплекса и анализ полученных результатов**» дается описание программного комплекса, предназначенного для определения процессов деформирования стержней при пространственном нагружении. Также приведен сравнительный анализ результатов численных расчетов, полученных при решении различных задач состояния деформирования стержней при пространственном нагружении с учетом температуры.

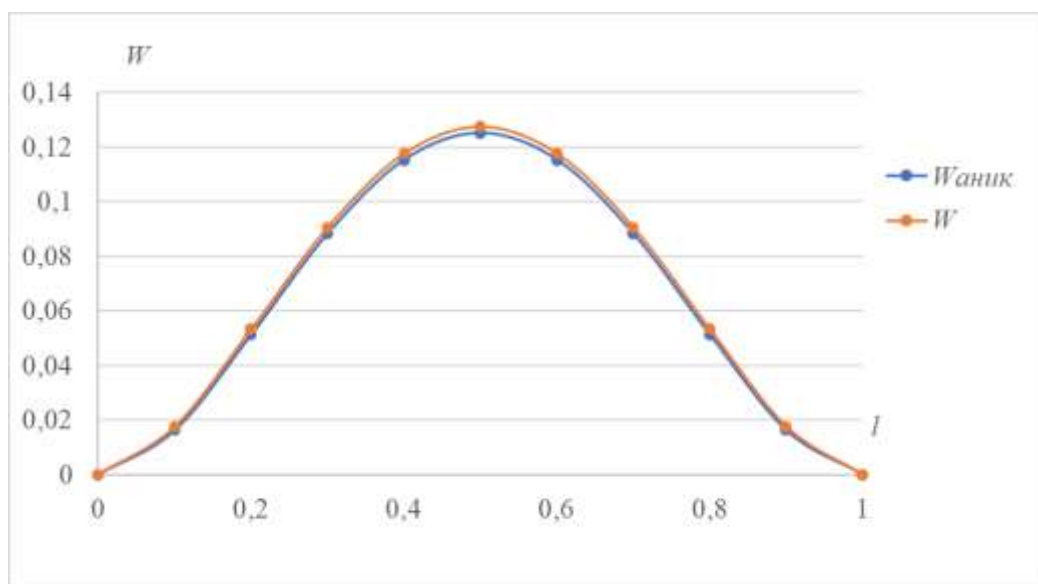


Рис.1. График сравнения результатов поперечных перемещений $W_{анник}$ и W численных решений.

На рис. 1 приведено сравнение общего решения изгиба стержня, закрепленного с обеих сторон, с приближенным решением упругости. Вычислительный эксперимент проводился при следующих параметрах: $l = 2$ м, $q = 50 \text{ Н / см}^2$, $h = 0.1$ м, $b_0 = 0.05$ м $E = 2 * 10^5 \text{ МПа}$

Экспериментальные результаты показывают, что максимальные смещения приближаются с разницей в 0,002.

На рис. 2 приведены результаты решения задачи изгиба стержня в вертикальной плоскости XOZ с учетом продольного перемещения $U : \vec{U} = \{W, \alpha_1, U\}$, $u_1 = U(x, t) - z\alpha_1(x, t)$, $u_3 = W$.

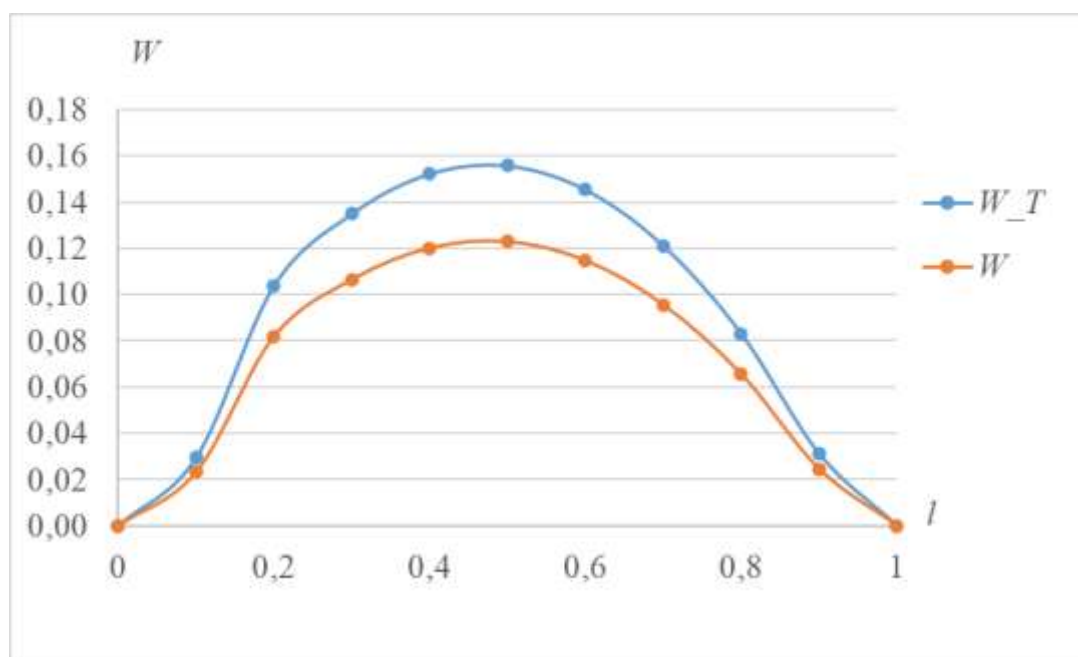


Рис. 2. Сравнительный анализ распределения поперечного перемещения W по длине стержня

В задаче проверено состояние деформации стержня с учетом температуры. Геометрические размеры стержня $a=0.1$ м, $b=0.05$ м, $l=2$ м, механические свойства: модуль Юнга $E = 2 * 10^5 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, значения сил, воздействующих на поверхность равны $q_1 = 1 \text{ Н / см}^2$, $q_3 = 50 \text{ Н / см}^2$ $M = 0,01 \text{ Н * см}$.

Анализ результатов сравнения решения второй задачи для стержня с двумя закрепленными сторонами показывает, что при учете температуры смещение центральной точки на W может достигать 18%.

На рис. 3 и 4 приведены результаты решения третьей задачи по определению перемещения центральных точек стержней сложного поперечного сечения при пространственном нагружении с учетом температуры и при совместном действии продольных, поперечных и крутильных сил.

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, y, z, t) &= U(x, t) - z\alpha_1(x, t) - y\alpha_2(x, t), \\ u_2(x, y, z, t) &= V(x, t) + z\theta(x, t), \quad u_3(x, y, z, t) = W(x, t) - y\theta(x, t). \end{aligned} \right\}$$

Вычислительный эксперимент проводился при следующих параметрах:
 $l = 2 \text{ м}$, $q_1 = 1 \text{ Н / см}^2$, $q_2 = 1 \text{ Н / см}^2$, $q_3 = 50 \text{ Н / см}^2$, $h = 0.1 \text{ м}$, $b_0 = 0.05 \text{ м}$
 $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ $M = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{см}$.

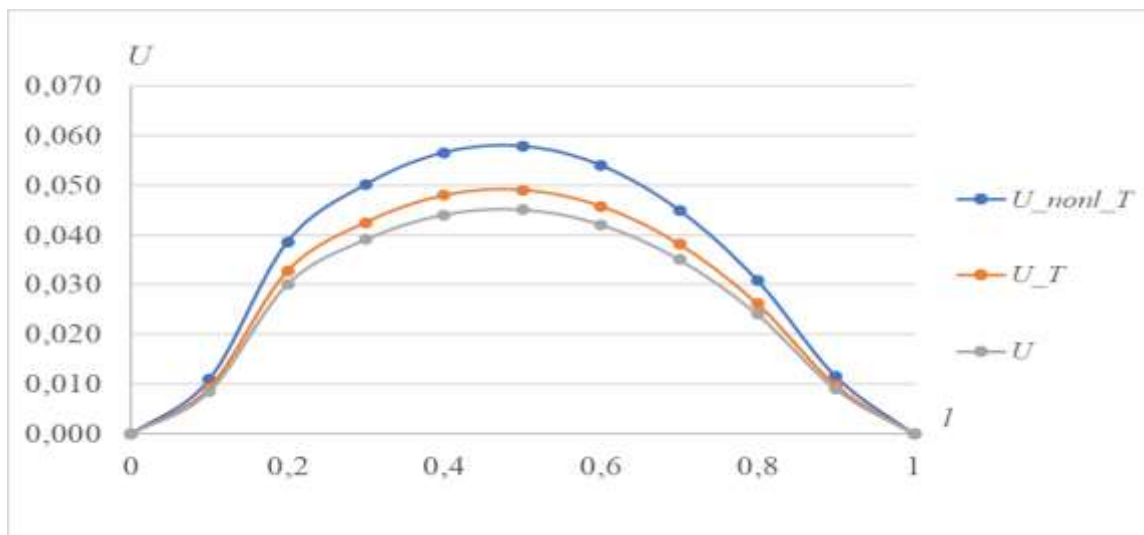


Рис.3. Сравнительный анализ продольного перемещения U по длине стержня

Продольное смещение в задаче, представленной на рис. 3, составило 15,2% нелинейных результатов сравнительного анализа U в отличие от линейных результатов и 22,1% нетемпературных смещений. Здесь U_{nonl_T} - продольное перемещений учетом нелинейности и температуры, U_T - продольное перемещений с учетом температуры.

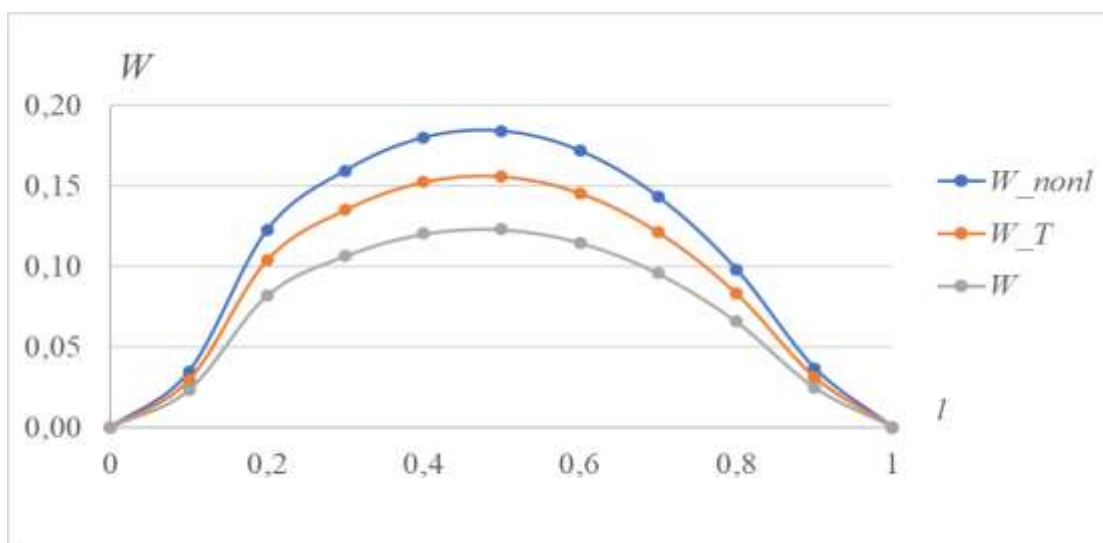


Рис. 4. Сравнительный анализ поперечного перемещения W с учетом температуры по длине стержня

Из анализа сравнительных результатов, показанных на рис. 4, разница между нелинейным результатом W_{nonl_T} и линейным результатом W_T составила 15,25%.

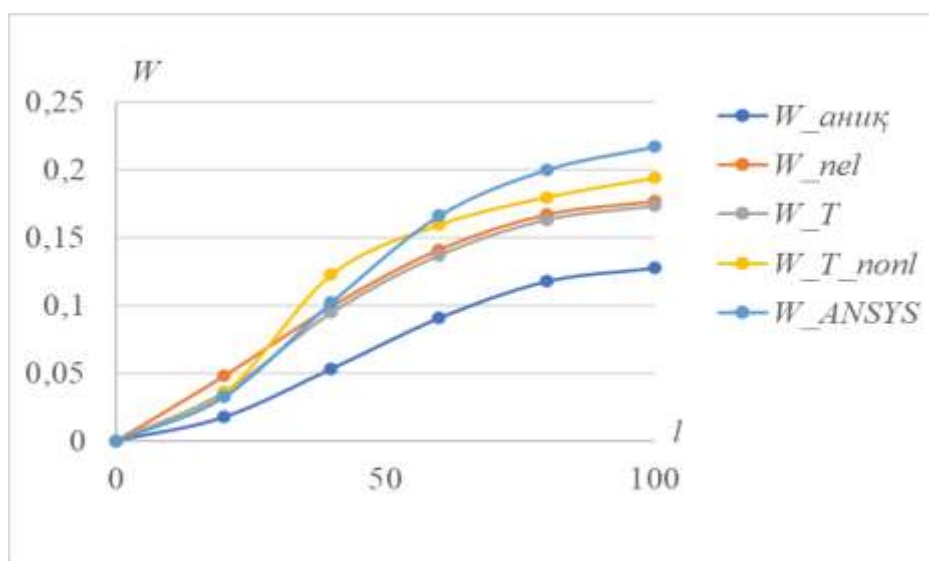


Рис. 5. Сравнительный анализ поперечного перемещения W с учетом температуры по длине стержня, закрепленного с обеих сторон

На рис. 5 приведены численные результаты сравнения решения задачи изгиба стержня, закрепленного с обеих сторон, где $W_{аник}$ – точные решения; W_{nel} – с учетом нелинейности; W_T – с учетом температуры; W_{T_nonl} – с одновременным учетом нелинейности и температуры; W_{ANSYS} – решение, полученное с помощью пакета «ANSYS». Сравнение численного решения W_{T_nonl} с другими решениями приводит к разнице в 0,1 мм для решения $W_{аник}$, 0,02 мм для решения W_T и 0,023 мм для численного результата, полученного в «ANSYS».

Результаты численных экспериментов показали, что с повышением температуры при нагружении увеличивается перемещение стержня, что в свою очередь позволяет исследовать состояние деформации стержня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы «Математическое моделирование геометрически нелинейных процессов пространственного нагружения стержней с учетом температуры», сводятся к следующему:

1. На основе вариационного принципа Остроградского-Гамильтона, теории упругих деформаций и уточненной теории В.К. Кабулова усовершенствованы обобщенные математические модели геометрически нелинейных задач для стержней произвольного сечения при пространственном нагружении. Данные модели послужили подробному описанию процессов геометрически нелинейного деформирования стержней с учетом совместных действий продольных, поперечных и крутильных сил.

2. Разработана усовершенствованная математическая модель с естественными начальными и граничными условиями для решения статических, динамических и геометрически нелинейных задач продольного, поперечного изгиба и поперечного кручения стержней произвольного сечения с учетом температуры при пространственном нагружении. Данная модель послужила исследованию деформационного состояния стержней с произвольным поперечным сечением.

3. Разработан численный алгоритм с использованием метода обработки цифровых бинарных изображений при определении геометрических и механических параметров стержней с произвольным поперечным сечением. Этот алгоритм позволил определить деформацию стержней сложной конфигурации.

4. На основе методов центральных конечных разностей, матричной прогонки и последовательных приближений разработан численный вычислительный алгоритм геометрически нелинейных задач для стержней произвольного поперечного сечения при пространственном нагружении. На основе данного алгоритма решены тестовые примеры, а полученные результаты оценены по критериям достоверности и точности.

5. Разработан программный комплекс для определения состояния деформации с учетом температуры геометрически нелинейных задач стержней произвольного сечения при пространственном нагружении. Данный программный комплекс послужил исследованию геометрически нелинейных процессов деформирования стержней при совместном действии продольных, поперечных и крутильных сил с учетом температуры.

6. Разработанные математические модели и программные комплексы внедрены на объектах: ООО «SARDOR LOYINA DIZAYN SERVIS», ООО «ZAMONAVIY LOYINA XIZMATI» и ООО «ПРОЕКТ-СЕРВИС». Результаты данного исследования в виде оптимальных вычислительных алгоритмов и программных пакетов позволили повысить общую производительность труда на 8-10% за счет двухкратного сокращения времени проектирования строительно-монтажных работ и сокращения на 5-10% материальных затрат за счет повышенной точности расчетов.

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

NAMANGAN ENGINEERING – CONSTRUCTION INSTITUTE

ISMOILOV SHOHIMARDON MUKHAMMADJONOVICH

**MATHEMATICAL MODELING OF GEOMETRICALLY NONLINEAR
PROCESSES OF RODS' SPATIAL LOADING TAKING INTO ACCOUNT
TEMPERATURE**

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) dissertation on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2021.4.PhD/T2085

The dissertation has been prepared at Namangan Engineering – Construction Institute.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the web-page of Scientific Council at the address www.tuit.uz and on the information – educational portal “ZiyoNet” at the address www.ziynet.uz.

Scientific adviser: **Anarova Shahzoda Amanbaevna**
doctor of technical Sciences, docent

Official opponents: **Nazirova Elmira Shodmonovna**
doctor of technical sciences, docent

Fayziyev Bekzodjon Murtazaevich
doctor of philosophy (PhD) in physics and mathematics

Leading organization: **Tashkent State Transport University**

The defense of the dissertation will take place on « 17 » december 2021 at 14⁰⁰ o'clock at the meeting of Scientific Council DSc.13/30.12.2019.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100202, Tashkent, A.Temur street, 108. Phone: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information-resource center of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under № 2676) (Address: 100202, Tashkent, A.Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52)

Abstract of dissertation sent out on “ 9 ” december 2021 year
(mailing report № 40 on “ 02 ” december 2021 year.).



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

Sh. A. Sadullayeva
Chairman of the academic seminar under the
scientific council awarding scientific degrees,
doctor of physical and mathematical sciences, docent

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research is to improve the mathematical model, develop computational algorithms and a software package under the influence of static and dynamic forces in the processes of geometric nonlinear deformation of arbitrary rods under spatial loading taking into account temperature.

The objects of the research are the processes of the stress-strain state, taking into account the geometric nonlinear properties of rods of arbitrary cross-section and temperature under spatial loading.

Scientific novelty of the research is as follows:

mathematical models of geometric nonlinear processes of rods under spatial loading taking into account temperature on the basis of refined theories of V.K. Kabulov and the theory of elasticity and the principle of variation of Ostrogradskiy-Hamilton were improved;

a computational algorithm was developed for solving static and dynamic, geometric nonlinear problems, taking into account the temperature of the rods under spatial loading on the basis of a finite-difference method, matrix drive methods for processing digital binary images and methods of sequential approximation;

algorithms for numerical calculation taking into account temperature in geometric nonlinear problems of the cross-section of arbitrary rods in spatial loads were developed;

a software package were developed for solving geometric nonlinear problems of rods of arbitrary cross-section of spatial loading using a combination of finite difference and matrix sweep methods.

Implementation of the research results. On the basis of the developed mathematical models, algorithms and a complex of programs for the study of geometric nonlinear processes of deformation of rods of an arbitrary section under spatial loading, taking into account the temperature:

The developed software package for virtual computational experiments based on finite difference and matrix sweep methods for solving static and dynamic geometrically nonlinear problems for rods under spatial loading, taking into account the temperature, was implemented in SARDOR LOYIHA DIZAYN SERVIS LLC and ZAMONAVIY LOYIHA XIZMATI LLC (reference of the Ministry for the Development of Information Technologies and Communications dated October 29, 2021 No. 33-8 / 7687). The results of this study, the use of optimal computational algorithms and software made it possible to increase labor productivity by 8-10% at the expense of reducing the design time for construction and installation works and to reduce material costs by 5-10% due to the increased accuracy of calculations;

a software package developed on the basis of a computational algorithm for solving static and dynamic problems together with methods of digital processing of binary images, finite-difference matrix sweep in determining geometric nonlinear deformation processes of an arbitrary cross-sectional rods, taking into account the

temperature, was implemented at PROEKT-SERVICE LLC (reference of the Ministry for the Development of Information Technologies and Communications dated October 29, 2021 No. 33-8 / 7687). The use of the software package made it possible to increase labor productivity by 10-15% at the expense of reducing the time spent on design processes and reducing material costs by 1.2 times at the expense of increasing the accuracy of calculations.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, conclusion, references and appendices. The volume of the dissertation is 118 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Anarova Sh., Ismoilov Sh.M. Mathematical simulation of stress-strain state of loaded rods with account of transverse bending // Journal of Physics: Conference Series. International scientific conference “Mechanical Science and Technology Update”. Series 1260 (2019). Omsk, Russia. – P. 1-7. (№3; Scopus; IF=0.7).

2. Anarova Sh. A., Ismoilov SH. M., Abdirozikov O. Sh. Software of Linear and Geometrically Non-linear Problems Solution Under Spatial Loading of Rods of Complex Configuration // Springer Nature Switzerland AG 2021, IHCI 2020, LNCS 12615. 2021. Intelligent Human Computer Interaction. 12th International Conference, IHCI 2020 Daegu, South Korea, November 24-26, 2020 Proceeding, Part I. –P. 380–390. (№3; Scopus; IF=0.6).

3. Анарова Ш.А, Исмоилова Ш.М., Шокиров Д.А. Усовершенствованный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния стержней произвольной геометрической формы в условиях пространственных нагрузок с учетом температуры. // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2021. Vol.3, №33. -С. 29–43. (05.00.00; №23).

4. Исмоилов Ш.М. Фазовий стерженда бўйлама ва кўндаланг тебранишини ҳароратни ҳисобга олган ҳолда математик моделлаштириш. // Наманган муҳандислик-технология институти илмий-техника журнали. 2020 йил Маҳсус сон № 1, -Б. 287-291. (05.00.00; №33).

5. Анарова Ш.А., Олимов М.О., Исмоилов Ш.М., Математическое моделирование колебания стержней с учетом поперечного изгиба. // “ТАТУ хабарлари” журнали. № 4 (56)/2020. –С. 13-32 . (05.00.00; № 31).

6. Anarova Sh.A., Ismoilov Sh.M. Mathematical support of the stress-strain state of rods under spatial load considering temperature. // Problems of Computational and Applied Mathematics, 2020. Vol. 4, № 28. -P. 4–20. (05.00.00; №23).

7. Anarova Sh.A., Olimov M., Ismoilov Sh.M. Mathematical modeling of stress-strain state of loaded rods with account of transverse bending // Bulletin of TUIT: Management and Communication Technologies: Vol. 1, Article 7. 2018., № 1(43). -P.11–22. (30.07.2020; №283/7.1).

8. Anarova Sh. A., Isomiddinov A. I., Ismoilov Sh. M. Numerical analysis of oscillations processes of spatially loaded rods // Problems of Computational and Applied Mathematics. 2019. Vol. 5, № 23. -P. 4–19. (05.00.00; №23).

9. Anarova Sh.A., Ismoilov Sh.M. Nonlinear mathematical model of stress-deformed state of spatially loaded rods with account for temperature. // International Uzbekistan-Malaysia conference on “Computational models and technologies (CMT2020)”, AIP Conf. Proc.2365, 1-5; (№3; Scopus; IF=0.4).

10. Олимов М., Каримов П., Исмоилов Ш.М. К решению краевых задач пространственных стержней при переменных упруго - пластических

нагружений с учетом разгрузки. // Фағона политехника институти илмий-техника журнали. -2014. -№4, -С. 113-116. (05.00.00; № 20).

11. Олимов М., Исмоилов Ш.М., Тўртинчи тартибли оддий дифференциал тенгламага келтириладиган чегаравий масалани дифференциал ҳайдаш усули ёрдамида сонли ечимини олиш. // “Ҳисоблаш ва амалий математика муаммолари” Ўзбекистон журнали. -Тошкент, 2017. -№3(9)/, -Б.33-36. (05.00.00; №23).

II бўлим (II часть; II part)

12. Анарова Ш.А, Исмоилов Ш.М. Исследование процессов колебания стержней с учетом поперечного изгиба. // “Автоматика и программная инженерия”. 2020 г, №3(33). - С. 37-45. <http://www.jurnal.nips.ru>.

13. Олимов М., Исмоилов Ш.М., Абдуллаев Э. Дифференциал тенгламага келтириладиган чегаравий масалани дифференциал ҳайдаш усули ёрдамида ечиш. // Ўзб. журнал “Илмий хабарнома”.- Андижон, 2014.- №4, -Б. 5-11.

14. Олимов М., Каримов П., Исмоилов Ш.М. К решению краевых задач пространственных стержней при переменных упруго-пластических нагружениях. // Молодой ученый. 2015. Vol. 13., № 100. -С. 162–167.

15. Олимов М., Исмоилов Ш.М. Комилов С.Р. Модульный анализ сеточных методов решения дифференциальных уравнений. // Молодой учёный. Научный журнал. №10(114). Казань - 2016 г. -С. 288-291.

16. Олимов М., Исмоилов Ш.М., Балкани соф эгилишини эластиклик-пластиклик назариясига асосан мувозанат тенгламасини куриш. // “Научное знание современности” Россия Федерацияси, Казань, 2017 г №6 (6) -Б. 107-111.

17. Анарова Ш., Исмоилов Ш. Фазовий юкланишдаги стерженларнинг геометрик ночизикли масалаларини ечишни температурани ҳисобга олган ҳолда математик моделлаштириш. // “Амалий математика ва информацион технологияларнинг долзарб муаммолари” мавзусидаги Халқаро конференция, ЎзР Миллий университети, Тошкент - 2019. – Б. 34-36.

18. Анарова Ш.А, Исмоилов Ш.М. Фазовий юкланишлардаги стерженларнинг геометрик ночизикли масалаларини ечишнинг математик моделларининг такомиллаштириш аҳамияти. // “Инвестицияларни диверсификациялаш асосида саноат корхоналари самарадорлигини ошириш” мавзусидаги конференцияси. Наманган – 2019. – Б.74-77.

19. Анарова Ш.А, Исмоилов Ш.М. Фазовий стерженларнинг геометрик ночизикли масалаларини ҳароратни ҳисобга олган ҳолда математик моделининг ечиш алгоритми // «Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: муаммолар ва ечимлар» мавзусидаги масофавий онлайн Халқаро илмий-амалий анжуман. Андижон, 2020. -Б. 34–36.

20. Anarova Sh. A., Ismoilov Sh. M. Mathematical modeling of the stress-strain state of rods under spatial load considering temperature. // Abstracts of the

International On line Conference “Frontier in mathematics and computer science” Tashkent – 2020, –P.16.

21. Анарова Ш.А, Исмоилоа Ш.М. Фазовий стерженлар тебранишининг геометрик нозизиқли масалаларини ҳароратни ҳисобга олган ҳолда математик модели ва ечиш усули. // “Илм-фан, таълим ва ишлаб чиқаришнинг инновацион ривожлантиришдаги замонавий муаммолар” мавзусидаги Халқаро илмий-амалий конференция. -Андижон. –2020. йил, -Б. 243-247.

22. Анарова Ш.А, Исмоилоа Ш.М., Эшқораева Н.Г. Фазовий юкланишдаги стерженлар тебранишининг геометрик чизиқсиз масалаларини ҳароратни ҳисобга олган ҳолда математик моделлаштириш // “Математик моделлаштириш, ҳисоблаш математикаси ва дастурий таъминот инженериясининг долзарб муаммолари” мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани. Қарши. – 2020 й. – Б. 155-119.

23. Анарова Ш.А, Исмоилов Ш.М. Нелинейная математическая модель пространственно-нагруженных стержней с учетом температуры. // “Илм – фан ва инновацион ютуқларни ривожлантиришнинг долзарб муаммолари” мавзусидаги илмий-амалий конференция. -Самарқанд. – 2020. – Б. 87-92.

24. Анарова Ш.А, Исмоилов Ш.М. Стержен масалаларини бўйлама ва кўндаланг тебранишини ҳароратни ҳисобга олган ҳолда математик моделлаштириш. // “Иқтисодиётнинг тармоқларини инновацион ривожланишида ахборот–коммуникация технологияларининг аҳамияти” Республика илмий – техник анжумани, ТАТУ, Тошкент– 2020. –Б. 56–58.

25. Анарова Ш.А, Исмоилов Ш.М. Стерженлар тебранишининг геометрик нозизиқли масалаларини ҳароратни ҳисобга олган ҳолда ечишнинг математик таъминоти. // “Ахборот-коммуникация технологиялари ва дастурий таъминот яратишда инновацион ғоялар” мавзусидаги Республика илмий–техник конференция. Самарқанд – 2020.– Б. 15-17.

26. Байбобоев Н.Г., Ш.М.Исмоилов, Гойипов У.Г. Кичик ҳажмдаги картошка қовлагични яшашда фойдаланиладиган деталлар чидамлилигини аниқлашнинг математик моделлари. // “Машинасозликда инновациялар, энергиятежамкор технологиялар ва ресурслардан фойдаланиш самарадорлигини ошириш” мавзусидаги Халқаро миқёсдаги илмий-амалий конференция. Наманган- 28-29 май 2021 йил, -Б. 310-314.

27. Анарова Ш.А, Исмоилоа Ш.М., Шокиров Д.А. Кўндаланг кесими ихтиёрий фазовий юкланган стерженларнинг ҳароратни ҳисобга олган ҳолда кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини аниқлашнинг математик модели. // “Ахборот тизимлари ва технологияларининг замонавий жамиятдаги ўрни” мавзусидаги ўтказиладиган Республика конференцияси. -Наманган. -2021 йил. -Б.151-153.

28. Анарова Ш.А, Исмоилоа Ш.М., Шокиров Д.А. Фазовий юкланишлардаги кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг ҳароратни ҳисобга олган ҳолда математик модели ва алгоритми. // «Инновацион ғоялар,

ишланмалар амалиётга: муаммолар, тадқиқотлар ва ечимлар» мавзусидаги онлайн Халқаро илмий-амалий конференция. -Андижон. 2021 йил. -Б. 149-153.

29. Анарова Ш. А., Исмоилов Ш. М., Шокиров Д. А. Кўндаланг кесими ихтиёрий стерженларнинг ҳароратни ҳисобга олган ҳолда деформацияланганлик ҳолатининг математик таъминоти // «Ахборот коммуникация технологиялари ва дастурий таъминот яратишда инновацион ғоялар» мавзусидаги Республика илмий-техник конференция. -Самарқанд, 2021. -Б. 17-19.

30. Анарова Ш.А., Исомиддинов А.И., Исмоилов Ш.М. Автоматизация расчета продольных и поперечных колебаний стержней для геометрически нелинейных задач с учетом температуре. // Свидетельство об официальной регистрации программы для электронно – вычислительных машин АИС при министерстве юстиции РУз. № DGU 08918. 24. 06.2020 г

31. Anarova Sh.A., Isomiddinov A.I., Ismoilov Sh.M., Shokirov D.A. Fazoviy yuklanishlardagi sterjenlarning ko‘ndalang kesimi ixtiyoriy va geometrik chiziqli bo‘lmagan masalalar uchun haroratni hisobga olgan holda kuchlanganlik va deformatsiyalanganlik holatini hisoblashlarni avtomatlashtirgan dastur. o‘zbekiston respublikasi adliya vazirligi huzuridagi intellektual mulk agentligi № DGU 12025, 2021.

32. Bayboboyev N.G., Anarova SH.A. , Ismoilov Sh. M. Goyipov U.G., Tursunov A.A., Akbarov Sh.B, Kartoshka kovlash mashinalarining elovchi ishchi qismlarining asosiy parametrlarini hisoblash, O‘zbekiston respublikasi adliya vazirligi huzuridagi intellektual mulk agentligi 09.08.2021 y. ro‘yxatdan o‘tkazilgan. № DGU 11451.

Автореферат «Муҳаммад ал-Хоразмий авлодлари" илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ҳамда ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

