ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.T.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК-ҚУРИЛИШ ИНСТИТУТИ

ИСОМИДДИНОВ АНВАРЖОН ИНОМЖОНОВИЧ

ФАЗОВИЙ ЎЗГАРУВЧАН ЮКЛАНИШЛАРДАГИ СТЕРЖЕНЛАРНИНГ ФИЗИК ЧИЗИҚСИЗ МАСАЛАЛАРИНИ ЕЧИШНИНГ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2018

УДК: 517.958:539.3, 519.62

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

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.T.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

НАМАНГАН МУҲАНДИСЛИК – ҚУРИЛИШ ИНСТИТУТИ

ИСОМИДДИНОВ АНВАРЖОН ИНОМЖОНОВИЧ

ФАЗОВИЙ ЎЗГАРУВЧАН ЮКЛАНИШЛАРДАГИ СТЕРЖЕНЛАРНИНГ ФИЗИК ЧИЗИҚСИЗ МАСАЛАЛАРИНИ ЕЧИШНИНГ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2018

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № B2017.2.PhD/T194 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 "Ziyonet" Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	**Юлдашев Таджимат** техника фанлари доктори
Расмий оппонентлар:	**Хужаев Исматулла Кушаевич** техника фанлари доктори
	Расулмухамедов Махамадазиз Махамадаминович физика-математика фанлари номзоди, доцент
Етакчи ташкилот:	**Тошкент кимё-технология институти**

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.T.07.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «____» ___________ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

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

Диссертация автореферати 2018 йил «____» _____________ куни тарқатилди.

(2018 йил «____» _____________ даги ____ 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

Н. Равшанов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар
раиси, т.ф.д.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда иншоот ва конструкцияларни лойиҳалашда қўлланиладиган материалларнинг физик-механик хусусиятларини баҳолашнинг автоматлаштирилган тизимларини яратишга, мавжудларини такомиллаштиришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Шу жиҳатдан лойиҳа ишларини замонавий компьютер технологиялари асосида самарали ташкил этиш йўналиши жадал суръатлар билан ривожланмоқда. Дунёнинг ривожланган мамлакатлари, жумладан, АҚШ, Япония, Италия, Хитой, Туркия, Ҳиндистон, Россия ва бошқа давлатларда конструкцион материалларнинг деформацияланиш жараён-ларини сонли ҳисоблашнинг математик моделлари, алгоритмлари ҳамда дастурий таъминотларини яратиш масалалари муҳим аҳамият касб этмоқда.

Жаҳон миқёсида конструкцион материалларнинг чизиқли ва мураккаб юкланишлардаги физик чизиқсиз масалаларини ҳал этишнинг умумлашган математик моделларини ишлаб чиқиш, ҳисоблаш алгоритмларини қуриш ва ривожлантиришга йўналтирилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу борада, жумладан стержен типидаги конструкция материалларига бўйлама, кўндаланг ва буровчи кучларнинг биргаликдаги таъсирини баҳолаш, материал кўндаланг кесимларида юзага келадиган ноэластик соҳаларни таснифлаш, фазовий такрорий юкланишлар таъсирида материалларнинг емирилиш ва шикастланиш ҳолатларини аниқлашнинг компьютер моделлари ва автоматлаштирилган тизимларини яратиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Республикамизда иншоотларни лойиҳалаш ва ҳисоблаш жараёнларини математик моделлаштириш, замонавий компьютер технологияларидан фойдаланиб конструкцияларнинг кучланганлик ҳолатларини баҳолаш ҳамда энг мақбул техник ва технологик ечимларни қабул қилишга хизмат қилувчи самарали ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш ва автоматлаштирилган махсус дастурий таъминотларни яратиш бўйича кенг қамровли чора тадбирлар амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан « … йўл-транспорт, муҳандислик-коммуникация ва ижтимоий инфратузилмаларни лойиҳалаш ҳамда модернизация қилиш, … инфор-мацион-коммуникацион технологияларни жорий этиш» [1] вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни бажаришда лойиҳалаш жараёнига замонавий ахборот технологияларини кенг жорий этиш, материалларнинг емирилишини ҳисобга олган ҳолда мураккаб ташқи кучлар таъсиридаги стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини ечиш имконини берувчи кўп параметрли умумлашган математик моделлар, самарали ҳисоблаш алгоритмлари ва махсус автоматлаштирилган тизимлар ишлаб чиқиш муҳим масалалардан бири ҳисобланади.

---

[1] Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2013 йил 27 июндаги ПҚ-1989-сон «Ўзбекистон Республикаси Миллий ахборот-коммуникация тизимини янада ривожлантириш тўғрисида»ги Қарори, Вазирлар Маҳкамасининг 2012 йил 1 февралидаги 24-сон «Жойларда компьютерлаштириш ва ахборот коммуникация технологияларини бундан кейинги ривожлантиришга шароитлар яратиш учун чора-тадбирлар тўғрисида»ги қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ташқи кучлар таъсиридаги стержен типидаги кострукция элементларининг деформацияланиш жараёнларини моделлаштириш бўйича жаҳондаги йирик олимлар, жумладан M.Petrangeli, P.P.Emilio, J.Colin, A.Fatemi, Y.Xiao, Y.Liu, H.Yang, A.S.Andras, R.F.Yьkseler, T.Huang, T.C.Duan, L.X.Li, T.XIA, W.YAO, J.ZOU, D.GAO, J.Sujuan, L.Jun, H.Hongxing, Sh.Rongying, T.Cenk, F.Jerome, E.J.Sapountzakis, V.G.Mokos, I.N.Vasserman, I.N.Shardakov, W.Yao, M.Jianwei, G.Vasudevan, S.Kothandaraman, S.Azhagarsamy, Г.Ю.Джанелидзе, В.З.Власов, В.В.Болотин, Д.Л.Быков, В.Г.Баженов, В.С.Бондарь, В.Г.Зубчанинов, А.А.Ильюшин, Д.Д.Ивлев, Л.М.Качанов, Ю.Г.Коротких, И.А.Кийко, В.В.Москвитин, Н.Н.Малинин, В.И.Мяченков, Б.Е.Победря, Ю.Н.Работнов ва бошқалар илмий тадқиқотлар олиб боришган. Емирилиш функцияси тушунчаси ва унинг моделлари В.В.Болотин, Л.М.Качанов, Ю.Н.Работнов, А.А.Ильюшин ва В.В.Москвитин томонидан киритилган.

Юртимизда стержен тизимларининг назарий асосларини такомиллаштириш ва ҳисоблаш усулларини ишлаб чиқишни ривожлантириш бўйича бир қатор олимлар илмий тадқиқот ишларини олиб боришган, жумладан академик В.Қ.Қобулов томонидан конструкция элементларининг чизиқли ва чизиқсиз деформацияланиш жараёнларини аниқлаштирилган назарияси ишлаб чиқилган ва амалий масалаларни ечишга алгоритмик ёндошувлар таклиф этилган. Ўзбекистонда туташ муҳитлар механикаси масалаларини алгоритмлаштириш ва автоматлаштириш масалалари дастлаб академик В.Қ.Қобулов томонидан қўйилган бўлиб, кейинчалик, Т.Бўриев, К.Ш.Бобомуродов, Ф.Б.Бадалов, Н.Мухитдинов, Б.Қурманбаев, Х.Эшматов, И.Алимов, Т.Юлдашев, Б.Мардонов, А.Холжигитов, Ш.А.Назиров, А.М.Полатов ва уларнинг шогирдлари томонидан ривожлантирилган.

Соҳага оид тадқиқотлар таҳлили шуни кўрсатадики, материалларнинг емирилишларини ҳисобга олган ҳолда стерженларнинг физик чизиқсиз деформацияланиш жараёнларини моделлаштириш ва ҳисоблашнинг автоматлаштирилган тизимларини яратиш муаммолари ҳозирги вақтгача етарлича ҳал этилмаган. Шунинг учун, аниқлаштирилган назариялар асосида, фазовий такрорий юкланишлардаги юпқа деворли стерженларнинг чизиқсиз деформацияланиш жараёнларини моделлаштириш, самарали ҳисоблаш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш, ҳамда дастурий таъминотини яратиш зарурати юзага келмоқда.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Наманган муҳандислик-қурилиш институти ҳамда Тошкент темир йўл муҳандислари институтининг илмий тадқиқот ишлари режасининг Ф4-003 «Ўзгарувчан юкланишлардаги эластик ёпишқоқ пластик тизимларнинг деформацияланиш ва емирилиш жараёнларини тадқиқ этишнинг сонли усулларини ишлаб чиқиш» (2012-2016) мавзусидаги лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади материалларнинг емирилишини ҳисобга олган ҳолда фазовий ўзгарувчан юкланишлардаги стерженлар физик чизиқсиз деформацияланиш жараёнларининг математик моделлари, самарали ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминотларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

бўйлама, кўндаланг ва буровчи кучларнинг биргаликдаги таъсирини ҳисобга олган ҳолда стерженларни чизиқсиз деформацияланиш жараёнларининг математик моделларини яратиш;

фазовий такрорий юкланишлардаги стерженларнинг кучланганлик ҳолатларини тадқиқ этишнинг жорий ва ўзгарувчан координаталар системалари учун кўп параметрли математик моделларини ишлаб чиқиш;

мураккаб юкланишлардаги стерженларнинг физик чизиқсиз масалалари учун геометрик, статик ва аралаш чегаравий шартларни вектор ва скаляр кўринишида ишлаб чиқиш;

чекли айирмалар усули ва итерацион жараёнлар асосида сонли ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

ишлаб чиқилган ҳисоблаш усуллари ва алгоритмларни аниқлик, турғунлик критерийлари асосида сонли тадқиқ этиш ва хатоликларни баҳолаш механизмларини ишлаб чиқиш;

самарали ҳисоблаш усулини танлаш ва тўр қадамининг турли қийматларида сонли тадқиқ этиш орқали ҳисоблаш алгоритмларини такомиллаштириш;

мураккаб юкланишлар таъсиридаги стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини турли чегаравий шартларда ечишнинг комплекс алгоритмлари ва автоматлаштирилган тизимларини яратиш;

физик чизиқсизлик билан боғлиқ бўлган янги эффектларни аниқлаш, ечимларни тасвирлаш ҳамда ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш механизмларини такомиллаштириш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида пластиклик ва емирилиш функцияларини ҳисобга олган ҳолда фазовий такрорий-ўзгарувчан юкланишлардаги стерженларнинг кучланганлик ҳолатлари ва деформацияланиш жараёнлари қаралган.

Тадқиқотнинг предмети мураккаб фазовий юкланишлар таъсирида стержен типидаги конструкция элементларининг чизиқсиз деформацияланиш жараёнларини тадқиқ этиш учун математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминотдан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини ечишда Лагранж вариацион тамойили, чекли айирмалар, марказий-айирмали схемалар, А.А.Самарский-И.В.Фрязинов модификациясига асосланган аппроксимациялар, А.А.Ильюшиннинг эластик ечим, ҳисоблаш математикаси усуллари ва алгоритмлаштириш услубларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

В.Қ.Қобуловнинг аниқлаштирилган назарияси ва вариацион тамойил асосида материалларнинг емирилишини ҳисобга олган ҳолда мураккаб ташқи кучлар таъсиридаги стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини ечиш учун математик моделлар ишлаб чиқилган;

фазовий такрорий юкланишлардаги стерженларнинг кучланганлик ҳолатларини ўзгармас ва фиктив координата системаларида ҳисоблашнинг табиий чегаравий шартли иккинчи тартибли тўққизта дифференциал тенгламалар системаси кўринишидаги кўп параметрли математик моделлари ишлаб чиқилган;

А.А.Ильюшиннинг эластик ечим усули бўйича стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини ечишнинг марказий-айирмали схемали ва чекли айирмалар усулининг А.А.Самарский-И.В.Фрязинов модификациялари асосидаги турли аппроксимацияли сонли ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

математик моделлари кўп параметрли дифференциал тенгламалар орқали ифодаланувчи стерженларнинг бир неча физик чизиқсиз масалаларини сонли ҳисоблашга йўналтирилган, аниқлик даражаси юқори, турғун ечимга тез яқинлашиш имконини берувчи самарали ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

геометрик, статик ва аралаш чегаравий шартлар билан стерженларнинг турли ўзгарувчан юкланишлар ва текисликлардаги физик чизиқсиз масалаларини компьютерда шакллантириш ҳамда ечиш имконини берувчи автоматлаштирилган тизим яратилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

физик чизиқсизликни ҳисобга олган ҳолда стерженларнинг жорий ва ўзгарувчан координаталар системаларидаги турли математик моделлари ишлаб чиқилган;

чекли айирмалар усулининг самарали ҳисоблаш алгоритмлари қурилган;

ўзгарувчан юкланишлар таъсиридаги стерженларнинг амалиётда қўлланилиш ҳолатларидан келиб чиқиб, геометрик, аралаш ва статик чегаравий шартлар ишлаб чиқилган;

материалларнинг емирилиши ва ноэластик деформацияланишини ҳисобга олган ҳолда лойиҳа ҳисоб ишлари учун стерженларнинг амалиётда қўлланилишига оид йигирмата физик чизиқсиз масалалари шакллантирилган;

стерженларнинг кўп вариантли чегаравий масалалари учун ҳисоб моделларини компьютерда шакллантириш ва сонли ечиш жараёнини автоматлаштириш имкониятини берувчи дастурлар мажмуи яратилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги Лагранж вариацион тамойили асосида масаланинг тўғри қўйилиши, математик амалларнинг қатъийлиги, асосланган сонли усуллар ва самарали ҳисоблаш алгоритмларидан фойдаланилганлиги, шунингдек, олинган тақрибий ечимлар аниқ ечимлар билан солиштирилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларнинг илмий аҳамияти стержен тизимларининг чизиқсиз деформацияланиш жараёнлари соҳасидаги кенг қамровли янги масалаларни математик моделлаштириш услуби таклиф этилганлиги, сонли-аналитик усуллар асосида универсал ва самарали ҳисоблаш алгоритмлари яратилганлиги, шунингдек, автоматлаштирилган алгоритмик-дастурий восита ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти фазовий такрорий-ўзгарувчан ташқи кучлар таъсиридаги стержен типидаги конструкциялар учун лойиҳа ҳисоб ишларини олиб боришда материал ва вақт сарфини камайтириш, бажарилган иш сифати ва меҳнат унумдорлигини ошириш, шунингдек, лойиҳа жараёнларини самарали ташкил этиш имкониятлари мавжудлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Пластиклик ва емирилиш функцияларини ҳисобга олган ҳолда стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини ечиш ҳамда материалларнинг кучланганлик ҳолатини баҳолаш бўйича яратилган математик моделлар, алгоритмлар ва дастурий мажмуалар асосида:

вариацион тамойил асосида ишлаб чиқилган, иккинчи тартибли чизиқсиз дифференциал тенгламалар системаси кўринишидаги математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурлар мажмуи «Tashkent metroproekt», “Techno engineering expert” ва “Zamin dizayn” масъулияти чекланган жамиятлари объектларига жорий этилган (Давлат архитектура ва қурилиш қўмитасининг 2018 йил 9 январдаги 164/02-13-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижалари лойиҳа ҳисоб ишлари учун вақт сарфини 2 марта тежаш ҳамда ҳисоблаш хатолигини 18 % гача камайтириш хисобига умумий лойиҳа жараёнларининг сифати ва тезлигини ошириш имконини берган;

фазовий такрорий-ўзгарувчан юкланишлардаги стерженларнинг физик чизиқсиз масалалари учун ишлаб чиқилган жорий ва ўзгарувчан координаталар системасидаги математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурлар мажмуи «Tashkent metroproekt» МЧЖ томонидан Тошкент метрополитени иншоотларини лойиҳалаш жараёнига жорий этилган (Давлат архитектура ва қурилиш қўмитасининг 2018 йил 9 январдаги 164/02-13-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида ишлаб чиқилган дастурий таъминот метрополитен иншоотларини лойиҳалаш ишлари самарадорлигини 12-18 % га ошириш имконини берган;

табиий чегаравий шартли иккинчи тартибли чизиқсиз дифференциал тенгламалар системаси учун чекли айирмалар усулининг А.А.Самарский-И.В.Фрязинов модификациялари асосида яратилган ҳисоблаш алгоритмлари “Techno engineering expert” МЧЖ томонидан қурилиш-монтаж ишларини лойиҳалаш жараёнига жорий этилган (Давлат архитектура ва қурилиш қўмитасининг 2018 йил 9 январдаги 164/02-13-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида яратилган сонли ҳисоблаш алгоритмлари конструкция элементларининг дастлабки ҳисоб ишларини сезиларли даражада яхшилаш, жумладан, ҳисоблаш аниқлигини 1,2 мартага, умумий лойиҳа жараёнининг сифати ва тезлигини эса 15-20 % гача ошириш имконини берган;

бўйлама, кўндаланг ва буровчи кучларнинг биргаликдаги таъсирини ҳисобга олган ҳолда стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини ҳисоблаш ва сонли натижаларни таҳлил этиш имконини берувчи автоматлашган тизим “Zamin dizayn” МЧЖ томонидан лойиҳа ҳисоб ишларини амалга ошириш жараёнига жорий қилинган (Давлат архитектура ва қурилиш қўмитасининг 2018 йил 9 январдаги 164/02-13-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида яратилган автоматлашган тизим ҳисоблаш хатолигини 18 % гача камайтириш, лойиҳалаш ишлари самарадорлигини 25 % гача ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари, жумладан 9 та халқаро ва 10 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот мавзуси бўйича 38 та илмий иш чоп этилган, шулардан, 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 16 та мақола, 1 таси хорижий ва 15 таси республика журналларида нашр қилинган ҳамда 1 та ЭҲМ учун яратилган дастурнинг расмий рўйҳатдан ўтказилганлиги тўғрисида гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, учта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 118 бетни ташкил этади.

ДИСЕРТАЦИЯНИНГ 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 **«Муаммонинг ўрганилганлик ҳолати таҳлили. Конструкция элементларининг чизиқсиз деформацияланиш жараёнларини математик моделлаштириш»** деб номланган биринчи бобида стержен типидаги конструкция элементларининг чизиқсиз деформацияланиш ва емирилиш жараёнларини математик моделлаштириш бўйича адабиётлар ва манбаалар шарҳи келтирилган.

В.Қ.Қобуловнинг аниқлаштирилган назарияси асосида бўйлама, кўндаланг ва буровчи кучларнинг биргаликдаги таъсирини ҳисобга олган ҳолда фазовий ўзгарувчан юкланишлардаги стержен нуқталарининг кўчишини қуйидаги тенглик кўринишида ифодалаш мумкин:

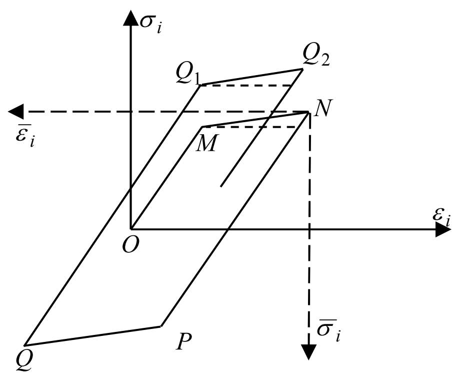
$$\begin{aligned} u_1^{(k)} &= U^{(k)} - z\alpha_1^{(k)} - y\alpha_2^{(k)} + \varphi \nu^{(k)} + a_1\beta_1^{(k)} + a_2\beta_2^{(k)}, \\ u_2^{(k)} &= V^{(k)} + z\theta^{(k)}, \quad u_3^{(k)} = W^{(k)} - y\theta^{(k)}, \end{aligned} \qquad (1)$$

бунда жорий координаталар системасида k юкланишлардаги $U^{(k)}$, $V^{(k)}$, $W^{(k)}$ – стерженнинг марказий чизиқларининг кўчиши; $\alpha_1^{(k)}$, $\alpha_2^{(k)}$ – соф эгилишда марказий чизиққа уринма оғиш бурчаклари; $\beta_1^{(k)}$, $\beta_2^{(k)}$ – кўндаланг силжиш бурчаклари; $\theta^{(k)}$ – буралиш бурчаги; $\nu^{(k)}$ – узунлиги бўйича буралиш бурчаги; a_1, a_2 – берилган функциялар; φ – буралиш функцияси.

Коши формуласига кўра (1) формулани ҳисобга олиб, k юкланишлардаги деформация компонентлари қуйидагича аниқланади:

$$\varepsilon_{11}^{(k)} = \frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial x}, \ \varepsilon_{12}^{(k)} = \frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial y} + \frac{\partial u_2^{(k)}}{\partial x}, \ \varepsilon_{13}^{(k)} = \frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial z} + \frac{\partial u_3^{(k)}}{\partial x}, \ \varepsilon_{22}^{(k)} = \varepsilon_{33}^{(k)} = \varepsilon_{23}^{(k)} = 0. \qquad (2)$$

Жорий ва ўзгарувчан координаталар системаларида (1-расм), k – юкланишлардаги кучланиш ва деформация компонентлари қуйидаги кўринишда боғланган:



1-расм. Жорий ва ўзгарувчан координаталар системаларида такрорий деформацияланиш жараёнлари

1. Т.Бўриевнинг умумлашган назарияси бўйича (*жорий координаталар системасида деформацияланиш диаграммаси*):

$$\left.\begin{aligned}
&\sigma_{11}^{(k)} = E\left[\left(1-\omega^{(k)}\right)\varepsilon_{11}^{(k)} - \omega^{(k)}\varepsilon_{11}^{0(k-1)} + \sum_{m=1}^{k-1}\omega^{0(k-m)}\left(\varepsilon_{11}^{0(k-m)} - \varepsilon_{11}^{0(k-m-1)}\right)\right],\\
&\sigma_{12}^{(k)} = G\left[\left(1-\omega^{(k)}\right)\varepsilon_{12}^{(k)} - \omega^{(k)}\varepsilon_{12}^{0(k-1)} + \sum_{m=1}^{k-1}\omega^{0(k-m)}\left(\varepsilon_{12}^{0(k-m)} - \varepsilon_{12}^{0(k-m-1)}\right)\right],\\
&\sigma_{13}^{(k)} = G\left[\left(1-\omega^{(k)}\right)\varepsilon_{13}^{(k)} - \omega^{(k)}\varepsilon_{13}^{0(k-1)} + \sum_{m=1}^{k-1}\omega^{0(k-m)}\left(\varepsilon_{13}^{0(k-m)} - \varepsilon_{13}^{0(k-m-1)}\right)\right],\\
&\sigma_{22}^{(k)} = \sigma_{33}^{(k)} = \sigma_{23}^{(k)} = 0,
\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

бу ерда $k=1$ да, $\varepsilon_{11}^{0(0)}=0$; $\varepsilon_{12}^{0(0)}=0$ ва $\varepsilon_{13}^{0(0)}=0$ га тенг, бунда E –эластиклик модули; G – силжиш модули; пластиклик функцияси – $\omega^{(k)}$ қуйидаги формула бўйича ҳисобланади:

$$k=1 \text{ да } \omega^{(1)} = \begin{cases} 0, & \varepsilon_1^{(1)} < 1,\\ \lambda\left(1-\dfrac{1}{\varepsilon_1^{(1)}}\right), & \varepsilon_1^{(1)} \ge 1; \end{cases} \qquad k \ge 2 \text{ да } \omega^{(k)} = \begin{cases} 0, & \varepsilon_1^{(k)} < \alpha_k,\\ \lambda\left(1-\dfrac{\alpha_k}{\varepsilon_1^{(k)}}\right), & \varepsilon_1^{(k)} \ge \alpha_k; \end{cases}$$

бу ерда $\varepsilon_1^{(k)} = \dfrac{\varepsilon_i^{(k)}}{\varepsilon_s}$, $\varepsilon_i^{(k)} = \dfrac{2}{3}\sqrt{\left(\varepsilon_{11}^{(k)}\right)^2 + \dfrac{3}{4}\left(\left(\varepsilon_{12}^{(k)}\right)^2 + \left(\varepsilon_{13}^{(k)}\right)^2\right)}$, $k=1,2,...,kk$ бўлганда (kk – юкланишлар сони чегараси), материалнинг циклик хусусияти – α_k қуйидагича ҳисобланади:

$$\alpha_k = Q(k-1)^{\wp},$$

бу ерда Q, $\wp$ - материалнинг ўзгармас коэффициентлари.

2. Мазинг-Москвитиннинг умумлашган тамойили бўйича (*ўзгарувчан координаталар системасида деформацияланиш диаграммаси*):

$$\bar{\sigma}_{11}^{(k)} = 3G\left(1-\omega^{(k)}\right)\bar{\varepsilon}_{11}^{(k)},\ \bar{\sigma}_{12}^{(k)} = G\left(1-\omega^{(k)}\right)\bar{\varepsilon}_{12}^{(k)},\ \bar{\sigma}_{13}^{(k)} = G\left(1-\omega^{(k)}\right)\bar{\varepsilon}_{13}^{(k)}, \quad (4)$$

бу ерда $\bar{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = \varepsilon_{ij}^{(k)}$ $(i=j=1,2,3)$ бўлиб, $\bar{\sigma}_{ij}^{(k)}$ ва $\bar{\varepsilon}_{ij}^{(k)}$ – ўзгарувчан координаталар системасида k юкланишлардаги кучланиш ва деформациялар. В.В.Москвитин назариясига кўра, материалларнинг емирилиш функцияси $\eta(x,y,z)$ такрорий юкланишлардаги барча кучланиш ва деформацияларни ҳисобга олган ҳолда $\eta(0)=0$ ва $\eta(N)=1$ чегаравий шартларда қуйидаги кинетик тенглама билан аниқланади:

$$\frac{d\eta}{dk} = A\left(\bar{\sigma}_u^{(k)}\right)^{\alpha}\left(1-\gamma\eta_k\right)^{-\beta} \qquad \text{ёки} \qquad \eta = \int_0^k F(k-m)\psi\left(\sigma_u^{(k)}\right)dm; \quad (5)$$

бу ерда A, α, β, γ – ўзгармаслар; N – чегара ҳолати (бузилиш) гача бўлган такрорланишлар сони; $\bar{\sigma}_u^{(k)}$ – кучланиш интенсивлиги.

Емирилишларнинг тўпланиши ҳисобга олинганда, пластиклик функцияси $\omega_{(x,y,z)}^{(k)}(\eta)$ қуйидагича аниқланади:

$$\omega_{(x,y,z)}^{(k)}(\eta)=\begin{cases}0, & \varepsilon_u^{(k)} \le \bar{\varepsilon}_s^{(k)}(\eta),\\ \lambda_k\left(1-\dfrac{\bar{\varepsilon}_s^{(k)}(\eta)}{\bar{\varepsilon}_u^{(k)}}\right), & \varepsilon_u^{(k)} > \bar{\varepsilon}_s^{(k)}(\eta).\end{cases} \tag{6}$$

Гусенков-Шнейдеровичнинг умумлашган деформацияланиш диаграммаси бўйича материалларнинг такрорий юкланишлардаги характеристикалари қуйидагича ҳисобланади:

такрорий юкланишларда мустаҳкамланувчи материаллар учун

$$g_k=\left[1+\frac{A^*}{2G}\frac{1}{(k-1)^\alpha}+\frac{1}{2G(k-1)^\alpha}\left(\frac{A-A^*}{2}-(-1)^k\frac{A-A^*}{2}\right)\right]^{-1};$$

такрорий юкланишларда бузилувчи материаллар учун

$$g_k=\left[1+\frac{A^*}{2G}\exp(\beta(k-1))+\frac{1}{2G}\exp(\beta(k-2))\left(\frac{A-A^*}{2}-(-1)^k\frac{A-A^*}{2}\right)\right]^{-1}.$$

Материалларнинг емирилишларини ҳисобга олган ҳолда стерженлар физик чизиқсиз масалаларининг математик моделлари Лагранж вариацион тамойили асосида ишлаб чиқилади:

$$\delta(-\Pi+A)=0\,. \tag{7}$$

Потенциал энергия вариацияси $\delta\Pi$ ва ташқи кучлар бажарган иш вариацияси δA қуйидаги кўринишга эга:

$$\delta\Pi=\int_V\sum_{i=1}^{3}\sigma_{1i}^{(k)}\delta\varepsilon_{1i}^{(k)}dV=\int_V\left[\sigma_{11}^{(k)}\delta\varepsilon_{11}^{(k)}+\sigma_{12}^{(k)}\delta\varepsilon_{12}^{(k)}+\sigma_{13}^{(k)}\delta\varepsilon_{13}^{(k)}\right]dV\,,$$

$$\delta A=\int_V\sum_{i=1}^{3}P_i^{(k)}\delta u_i^{(k)}dV+\int_S\sum_{i=1}^{3}f_i^{(k)}\delta u_i^{(k)}dS+\int_F\sum_{i=1}^{3}q_i^{(k)}\delta u_i^{(k)}dF\Bigg|_x\,,$$

бу ерда $P_i^{(k)}$, $f_i^{(k)}$ и $q_i^{(k)}$ – мос равишда, k юкланишлардаги ҳажмий, сирт ва четки ташкил этувчи кучлар.

Лагранж вариацион тамойили асосида, фазовий такрорий-ўзгарувчан юкланишлардаги стерженларнинг физик чизиқсиз масалалари учун табиий чегаравий шартли иккинчи тартибли чизиқсиз дифференциал тенгламалар системалари орқали ифодаланувчи вектор шаклдаги математик моделлар ишлаб чиқилган:

1. Жорий координаталар системасидаги математик модель:

$$\frac{d}{d\bar{x}}\left[\left(A^u-A^{p(k)}\right)\frac{d\vec{V}^{(k)}}{d\bar{x}}+\left(B^u-B^{p(k)}\right)\vec{V}^{(k)}\right]+\left(C^u-C^{p(k)}\right)\frac{d\vec{V}^{(k)}}{d\bar{x}}+$$

$$+\left(D^u-D^{p(k)}\right)\vec{V}^{(k)}=\vec{F}^{(k)}+$$

$$+\frac{d}{d\bar{x}}\left[A^{p(k)}\frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{d\bar{x}}+B^{p(k)}\vec{V}^{0(k-1)}\right]+C^{p(k)}\frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{d\bar{x}}+D^{p(k)}\vec{V}^{0(k-1)}+$$

$$+\sum_{m=1}^{k-1}\left\{\frac{d}{d\bar{x}}\left[A^{po(k-m)}\frac{d}{d\bar{x}}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)+B^{po(k-m)}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)\right]+\right.$$

$$+C^{po(k-m)}\frac{d}{d\bar{x}}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)+D^{po(k-m)}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)\Bigg\} \qquad (8)$$

ва мос равишда, чегаравий шартлар

$$\Bigg\{\left(A^u-A^{p(k)}\right)\frac{d\vec{V}^{(k)}}{d\bar{x}}+\left(B^u-B^{p(k)}\right)\vec{V}^{(k)}-\vec{Q}^{(k)}-$$

$$-A^{p(k)}\frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{d\bar{x}}-B^{p(k)}\vec{V}^{0(k-1)}-\sum_{m=1}^{k-1}\Bigg[A^{po(k-m)}\frac{d}{d\bar{x}}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)+$$

$$+B^{po(k-m)}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)\Bigg\}\delta\vec{V}^{(k)}\Bigg|_{\Gamma}=0\,; \qquad (9)$$

бунда $\vec{V}^{(k)}$ – изланаётган тўққизинчи тартибли вектор функция $\left(\vec{V}^{(k)}=\left|W^{(k)},\alpha_1^{(k)},\beta_1^{(k)},V^{(k)},\alpha_2^{(k)},\beta_2^{(k)},U^{(k)},\theta^{(k)},\nu^{(k)}\right|^T\right)$; $\vec{F}^{(k)}$, $\vec{Q}^{(k)}$ – ташқи кучлар вектори.

2. Ўзгарувчан координаталар системасидаги математик модель:

$$\frac{d}{d\bar{x}}\left[\left(A^u-A^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\bar{V}}^{(k)}}{d\bar{x}}+\left(B^u-B^{p(k)}\right)\vec{\bar{V}}^{(k)}\right]+\left(C^u-C^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\bar{V}}^{(k)}}{d\bar{x}}+$$

$$+\left(D^u-D^{p(k)}\right)\vec{\bar{V}}^{(k)}=\vec{F}^{(k)}, \qquad (10)$$

$$\left\{\left(A^u-A^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\bar{V}}^{(k)}}{d\bar{x}}+\left(B^u-B^{p(k)}\right)\vec{\bar{V}}^{(k)}-\vec{Q}^{(k)}\right\}\delta\vec{\bar{V}}^{(k)}\Bigg|_{\Gamma}=0\,. \qquad (11)$$

бунда A^u , B^u , C^u , D^u – ўзгармас коэффициентли тўққизинчи тартибли квадрат матрицалар; $A^{p(k)}$, $B^{p(k)}$, $C^{p(k)}$, $D^{p(k)}$ – ўзгарувчан коэффициентли тўққизинчи тартибли квадрат матрицалар.

Параметрларнинг ҳақиқий қийматини аниқлаш учун қуйидаги формулалардан фойдаланамиз:

$$\vec{V}^{(k)}=\vec{\bar{V}}'+\sum_{k=2}^{kk}(-1)^{k-1}\vec{\bar{V}}^{(k)}, \quad \sigma_{ij}^{(k)}=\sigma_{ij}^{'}+\sum_{k=2}^{kk}(-1)^{k-1}\bar{\sigma}_{ij}^{(k)}\,. \qquad (12)$$

Кўчиш векторлари асосида, фазовий ўзгарувчан юкланишлардаги стерженларнинг ички кучлар векторлари қуйидаги математик моделлар асосида аниқланади:

1. Жорий координаталар системасида ички кучларнинг хисоб моделлари:

$$\vec{P}^{(k)}=\sum_{i=1}^{3}\vec{P}_i^{(k)}, \qquad (13)$$

бу ерда

$$\vec{P}_1^{(k)}=\frac{l^3}{3Gh_0I_0}\left\{\left(\widetilde{A}^u-\widetilde{A}^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\widetilde{\bar{V}}}^{(k)}}{d\bar{x}}+\left(\widetilde{B}^u-\widetilde{B}^{p(k)}\right)\vec{\widetilde{\bar{V}}}^{(k)}\right\},$$

$$\vec{P}_2^{(k)} = \frac{l^3}{3Gh_0 I_0}\left\{\widetilde{A}^{p(k)}\frac{d\vec{\widetilde{V}}^{0(k-1)}}{d\overline{x}} + \widetilde{B}^{p(k)}\vec{\widetilde{V}}^{0(k-1)}\right\},$$

$$\vec{P}_3^{(k)} = \frac{l^3}{3Gh_0 I_0}\left\{\sum_{m=1}^{k-1}\left[\widetilde{A}^{po(k-m)}\frac{d\left(\vec{\widetilde{V}}^{0(k-m)} - \vec{\widetilde{V}}^{0(k-m-1)}\right)}{d\overline{x}} + \widetilde{B}^{po(k-m)}\left(\vec{\widetilde{V}}^{0(k-m)} - \vec{\widetilde{V}}^{0(k-m-1)}\right)\right]\right\};$$

бунда $\vec{P}^{(k)}$ – ўн иккинчи тартибли вектор функция:

$$\vec{P}^{(k)} = \left|\overline{Q}_1^{(k)}, \overline{M}_y^{(k)}, \overline{M}_{a_1}^{(k)}, \overline{Q}_2^{(k)}, \overline{M}_z^{(k)}, \overline{M}_{a_2}^{(k)}, \overline{N}_x^{(k)}, \overline{M}_x^{(k)}, \overline{M}_\varphi^{(k)}, \overline{Q}_{a_1}^{(k)}, \overline{Q}_{a_2}^{(k)}, \overline{M}_{\overline{\varphi}}^{(k)}\right|^T;$$

$\widetilde{A}^u$, $\widetilde{A}^{p(k)}$, $\widetilde{B}^u$, $\widetilde{B}^{p(k)}$ – ўн иккинчи тартибли квадрат матрицалар ва уларнинг элементлари қуйидаги кўринишда ифодаланади: $\widetilde{a}_{10,s} = b_{s,5}$, $\widetilde{a}_{11,s} = b_{s,6}$, $\widetilde{a}_{12,s} = b_{s,4}$, $\widetilde{b}_{ij} = b_{ij}$, $\widetilde{b}_{10,s} = d_{2,s}$, $\widetilde{b}_{11,r} = d_{r,6}$, $\widetilde{b}_{12,r} = d_{r,4}$, $i, j = 1,2,3,...,9$; $s = 7,8,9$; $r = 2,3,4,5,6$; $\vec{\widetilde{V}}$ – ўн иккинчи тартибли вектор функция.

2. Ўзгарувчан координаталар системасида ички кучларнинг ҳисоб моделлари:

$$\vec{\widetilde{P}} = \frac{l^3}{3Gh_0 I_0}\left\{\left(\widetilde{A}^u - \widetilde{A}^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\widetilde{V}}^{(k)}}{d\overline{x}} + \left(\widetilde{B}^u - \widetilde{B}^{p(k)}\right)\vec{\widetilde{V}}^{(k)}\right\}. \tag{14}$$

Кучларнинг ҳақиқий қийматлари қуйидагича аниқланади:

$$\vec{P}^{(k)} = \vec{P}' + \sum_{k=2}^{kk}(-1)^{k-1}\vec{\overline{P}}^{(k)}. \tag{15}$$

Юқорида келтирилган моделларни қуришда қуйидаги кўринишдаги ўлчовсиз катталиклардан фойдаланилган: $x = l\overline{x}$, $y = b_0\overline{y}$, $z = h_0\overline{z}$, $U = h_0\overline{U}$, $V = h_0\overline{V}$, $W = h_0\overline{W}$, $\alpha_1 = \frac{h_0}{l}\overline{\alpha}_1$, $\beta_1 = \frac{h_0}{l}\overline{\beta}_1$, $\alpha_2 = \frac{h_0}{l}\overline{\alpha}_2$, $\beta_2 = \frac{h_0}{l}\overline{\beta}_2$ ва $\nu = \frac{1}{l}\overline{\nu}$.

Диссертациянинг **«Ишлаб чиқилган математик моделларни ҳисоблаш алгоритмлари ва дискрет аналоглари»** деб номланган иккинчи бобида чекли айирмалар усулининг икки хил алмаштиришлари: марказий-айирмали схемалар (МАС) ва А.А.Самарский-И.В.Фрязинов (СФМ) модификациялари асосида ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Геометрик, статик ва аралаш чегаравий шартлар шакллантирилган.

Чегаравий масала (8)-(9) МАС бўйича аппроксимацияланиб, қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\left(A_i^u - A_i^{p(k)}\right)\vec{V}_{i+1}^{(k)} - \left(B_i^u - B_i^{p(k)}\right)\vec{V}_i^{(k)} + \left(C_i^u - C_i^{p(k)}\right)\vec{V}_{i-1}^{(k)} =$$

$$= \vec{F}_i^{(k)} + \vec{F}_i^{p(k)} + \vec{F}_i^{po(k)}, \tag{16}$$

$$i = 1,2,...,n-1;$$

$$\left.\begin{aligned}
\vec{V}_0^{(k)} &= \left(T_0\left(B_0^{u} - B_0^{p(k)}\right) - \frac{3}{2h}K_0\left(A_0^{u} - A_0^{p(k)}\right)\right)^{-1}\vec{\bar{Q}}_0^{(k)} - \\
&\quad - \frac{4}{2h}K_0\left(A_0^{u} - A_0^{p(k)}\right)\vec{V}_1^{(k)} + \frac{1}{2h}K_0\left(A_0^{u} - A_0^{p(k)}\right)\vec{V}_2^{(k)}, \\
\vec{V}_N^{(k)} &= \left(T_N\left(B_N^{u} - B_N^{p(k)}\right) - \frac{3}{2h}K_N\left(A_N^{u} - A_N^{p(k)}\right)\right)^{-1}\vec{\bar{Q}}_N^{(k)} - \\
&\quad - \frac{4}{2h}K_N\left(A_N^{u} - A_N^{p(k)}\right)\vec{V}_{N-1}^{(k)} + \frac{1}{2h}K_N\left(A_N^{u} - A_N^{p(k)}\right)\vec{V}_{N-2}^{(k)}.
\end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

(16) алгебраик тенгламани (17) чегаравий шарт билан ечиш учун қуйидаги рекурент формулалардан фойдаланиб, ҳайдаш усули қўлланилади:

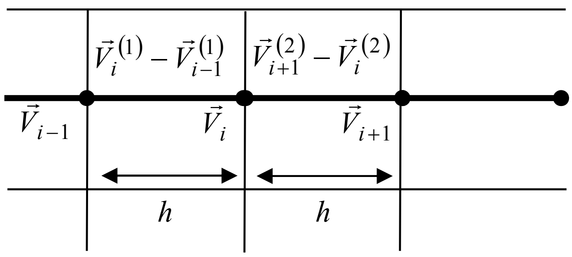
$$\vec{V}_i^{(k)} = \alpha_i^{(k)}\vec{V}_{i+1}^{(k)} + \beta_i^{(k)}, \quad i = N-1,\ldots 1; \qquad (18)$$

бу ерда

$$\alpha_i^{(k)} = \left(\bar{B}_i^{(k)} - \bar{C}_i^{(k)}\alpha_{i-1}^{(k)}\right)^{-1} \cdot \bar{A}_i^{(k)}; \; \beta_i^{(k)} = \left(\bar{B}_i^{(k)} - \bar{C}_i^{(k)}\alpha_{i-1}^{(k)}\right)^{-1}\left(\bar{C}_i^{(k)}\beta_{i-1}^{(k)} - \vec{\bar{F}}_i^{(k)}\right),$$

$$i = 1,2,3,\ldots,N-1.$$

СФМида (8) вектор тенглама икки гуруҳга ажратилган ҳолда айирмали схемаларда $O\left(h^2\right)$ тартиб билан аппроксимацияланади (2-расм).



2-расм. СФМ си схемаси

$$\begin{aligned}
&\frac{\left(A_{i+1/2}^{u} - A_{i+1/2}^{p(k)}\right)}{h}\vec{V}_{i+1}^{(k)(1)} - \left(\frac{\left(A_{i+1/2}^{u} - A_{i+1/2}^{p(k)}\right)}{h} + \frac{\left(A_{i-1/2}^{u} - A_{i-1/2}^{p(k)}\right)}{h} - h\left(D_i^{u} - D_i^{p(k)}\right)\right) \times \\
&\times \vec{V}_i^{(k)(1)} + \frac{\left(A_{i-1/2}^{u} - A_{i-1/2}^{p(k)}\right)}{h}\vec{V}_{i-1}^{(k)(1)} + \left(\left(B_{i+1}^{u} - B_{i+1}^{p(k)}\right) + \left(C_i^{u} - C_i^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_{i+1}^{(k)(2)} - \\
&- \left(\left(B_i^{u} - B_i^{p(k)}\right) + \left(C_i^{u} - C_i^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_i^{(k)(2)} = h\left(\vec{F}_i^{(k)(1)} + \vec{F}_i^{p(k)(1)} + \vec{F}_i^{po(k-m)(1)}\right); \\
&\frac{\left(A_{i+1/2}^{u} - A_{i+1/2}^{p(k)}\right)}{h}\vec{V}_{i+1}^{(k)(2)} - \left(\frac{\left(A_{i+1/2}^{u} - A_{i+1/2}^{p(k)}\right)}{h} + \frac{\left(A_{i-1/2}^{u} - A_{i-1/2}^{p(k)}\right)}{h} - h\left(D_i^{u} - D_i^{p(k)}\right)\right) \times \\
&\times \vec{V}_i^{(k)(2)} + \frac{\left(A_{i-1/2}^{u} - A_{i-1/2}^{p(k)}\right)}{h}\vec{V}_{i-1}^{(k)(2)} + \left(-\left(B_i^{u} - B_i^{p(k)}\right) - \left(C_i^{u} - C_i^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_i^{(k)(1)} + \\
&+ \left(-\left(B_{i-1}^{u} - B_{i-1}^{p(k)}\right) - \left(C_i^{u} - C_i^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_{i-1}^{(k)(1)} = h\left(\vec{F}_i^{(k)(2)} + \vec{F}_i^{p(k)(2)} + \vec{F}_i^{po(k-m)(2)}\right). \qquad (19)
\end{aligned}$$

(19) тенгламалар системасига $\vec{U}_i^{(k)} = \begin{bmatrix} \vec{V}_i^{(k)(1)} \\ \vec{V}_i^{(k)(2)} \end{bmatrix}$ катакли вектор киритиб, қуйидаги алгебраик тенгламани оламиз:

$$\hat{A}_i^{(k)}\vec{U}_{i+1}^{(k)} - \hat{B}_i^{(k)}\vec{U}_i^{(k)} + \hat{C}_i^{(k)}\vec{U}_{i-1}^{(k)} = \hat{F}_i^{(k)}, \quad i = 1,2,...,n-1; \tag{20}$$

бу ерда $\vec{U}_i^{(k)}$– изланаётган катакли вектор функция; $\hat{A}_i^{(k)}$, $\hat{B}_i^{(k)}$, $\hat{C}_i^{(k)}$– катакли матрицалар, $\hat{F}_i^{(k)}$ – катакли вектор.

(9) чегаравий шарт СФМ бўйича қуйидагича аппроксимацияланади:

$$\left.\begin{aligned}
&\left(2hT_0\left(B_0^u - B_0^{p(k)}\right) - 3K_0\left(A_0^u - A_0^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_0^{(k)^{(\alpha)}} + 4K_0\left(A_0^u - A_0^{p(k)}\right)\vec{V}_1^{(k)^{(\alpha)}} - \\
&- K_0\left(A_0^u - A_0^{p(k)}\right)\vec{V}_2^{(k)^{(\alpha)}} = 2h\left(\vec{Q}_0^{(k)^{(\alpha)}} + \vec{Q}_0^{p(k)^{(\alpha)}} + \vec{Q}_0^{po(k-m)^{(\alpha)}}\right), \\
&\left(2hT_N\left(B_N^u - B_N^{p(k)}\right) - 3K_N\left(A_N^u - A_N^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_N^{(k)^{(\alpha)}} + 4K_N\left(A_N^u - A_N^{p(k)}\right)\vec{V}_{N-1}^{(k)^{(\alpha)}} - \\
&- K_N\left(A_N^u - A_N^{p(k)}\right)\vec{V}_{N-2}^{(k)^{(\alpha)}} = 2h\left(\vec{Q}_N^{(k)^{(\alpha)}} + \vec{Q}_N^{p(k)^{(\alpha)}} + \vec{Q}_N^{po(k-m)^{(\alpha)}}\right);
\end{aligned}\right\} \tag{21}$$

бу ерда $\alpha = 1,2$.

(21) чегаравий шартга $\vec{U}_i^{(k)}$ $\left(i = 0,1,2, N, N-1, N-2\right)$ катакли вектор киритиб, қуйидаги алгебраик тенгламаларни оламиз:

$$i = 0 \text{ да} \qquad \hat{L}_0^{(k)}\vec{U}_0^{(k)} + \hat{L}_1^{(k)}\vec{U}_1^{(k)} + \hat{L}_2^{(k)}\vec{U}_2^{(k)} = \hat{Q}_i^{(k)}, \tag{22}$$

$$i = N \text{ да} \qquad \hat{L}_3^{(k)}\vec{U}_N^{(k)} + \hat{L}_4^{(k)}\vec{U}_{N-1}^{(k)} + \hat{L}_5^{(k)}\vec{U}_{N-2}^{(k)} = \hat{Q}_i^{(k)}; \tag{23}$$

бунда $\hat{L}_\beta^{(k)}$ $\left(\beta = \overline{0,1,...,5}\right)$ – катакли матрицалар; $\hat{Q}_i^{(k)}$ – катакли вектор.

Ишлаб чиқилган (20), (22), (23) Коши масаласини ечими қуйидаги кўринишда топилади:

$$\vec{U}_i^{(k)} = \hat{\alpha}_i^{(k)}\vec{U}_{i+1}^{(k)} + \vec{\beta}_i^{(k)}, \quad i = N-1,....,1; \tag{24}$$

бунда $\hat{\alpha}_i^{(k)} = \left(\hat{B}_i^{(k)} - \hat{C}_i^{(k)}\hat{\alpha}_{i-1}^{(k)}\right)^{-1} \cdot \hat{A}_i^{(k)}$, $\vec{\beta}_i^{(k)} = \left(\hat{B}_i^{(k)} - \hat{C}_i^{(k)}\hat{\alpha}_{i-1}^{(k)}\right)^{-1}\left(\hat{C}_i^{(k)}\vec{\beta}_{i-1}^{(k)} - \vec{F}_i^{(k)}\right)$, $i = 1,2,3,..., N-1$.

Ҳар бир юкланишларда кўчиш катакли вектори $\vec{U}_i^{(k)}$ аниқланади ва ҳисоблаш алгоритмининг сўнгги босқичида кўчиш векторининг ҳақиқий қиймати қуйидаги кўринишда топилади:

$$\vec{V}_i^{(k,\gamma)} = \left(\vec{V}_i^{(k)^{(1)}} + \vec{V}_i^{(k)^{(2)}}\right)\Big/2. \tag{25}$$

Кўчиш вектори аниқлангандан сўнг, стерженнинг ички кучлар вектори $\vec{P}_i^{(k)}$ ҳисобланади. Бунда қуйидаги шарт таъминланиши лозим:

$$\max_i\left|\vec{V}_i^{(k,\bar{\gamma}+1)} - \vec{V}_i^{(k,\bar{\gamma})}\right| < \varepsilon_1 \max_i\left|\vec{V}_i^{(k,\bar{\gamma}+1)}\right| \tag{26}$$

бунда $\bar{\gamma}$ – итерация сони; ε_1 – ҳисоблаш аниқлиги.

Ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритмлари асосида тест масалалари ечилди ва олинган сонли натижалар ишончлилик, аниқлик ҳамда турғунлик мезонлари асосида баҳоланди.

1-масала. Чекли айирмалар усулининг МАС ва СФМ асосида ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритмларини синов функциялар усули ёрдамида баҳолаш.

Синов функцияси сифатида ўзгармас коэффициентли иккинчи тартибли дифференциал тенгламалар системаси мавжуд чегаравий шартларда қаралган. Масала МАС ва СФМ асосидаги ҳисоблаш алгоритмларида ечилиб, олинган сонли натижалар жадвал кўринишида келтирилган (1-жадвал).

1-жадвал

МАС ва СФМ аппроксимациялари натижаларининг солиштирма баҳоси

Аниқ ечим $\max\left(\vec{V}_i(x)\right)$	Аппрок-сима-циялар	Тугунлар сонининг турли қийматларидаги тақрибий ечимлар				
		$N=10$	$N=20$	$N=40$	$N=80$	$N=160$
$\vec{V}_3(0.5)$=0,1875	ЦРС	0,196084	0,189646	0,188036	0,1876341	0,1875335
	МСФ	0,195260	0,189447	0,187987	0,1876218	0,1875304
Хатолик (%)	ЦРС	4,57	1,14	0,286	0,072	0,018
	МСФ	4,13	1,03	0,260	0,065	0,016

2-масала. Математик модель адекватлигини текшириш. Ушбу мисолда Лагранж вариацион тамойили асосида ишлаб чиқилган тўртинчи тартибли дифференциал тенглама кўринишидаги математик моделнинг адекватлик масалалари қаралган. $W\Big|_{\substack{x=0\\x=L}}=0$, $\left.\dfrac{dW}{dx}\right|_{\substack{x=0\\x=L}}=0$ чегаравий шарт билан тенгламанинг аниқ ечими қурилган.

Чегаравий масала тўр қадами h ($h=1/N$, $N-$ узеллар сони) нинг турли қийматларида ечилган. Стерженнинг механик, геометрик параметрлари қуйидагича олинган: l=2 *м;* h_0=0,1 *м;* b_0=0,05 *м;* f_3^+=5 *МПа;* $E=2\cdot10^5$ *МПа.*

2-жадвал

Стержен эгилиши w нинг аниқ ва тақрибий қийматлари

	x	Аниқ ечим	Тақрибий ечимлар				
			$N=10$	$N=20$	$N=40$	$N=80$	$N=160$
w	0.0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0,0512	0,0576	0,0528	0,051600	0,051300	0,051224
	0.5	0,1250	0,1354	0,1275	0,125625	0,125156	0,125039

3-масала. XOZ вертикал текисликда стержен эгилиши масаласи.

Ушбу мисолда буралиш бурчаги α_1 ни ҳисобга олган ҳолда XOZ вертикал текисликда икки томони маҳкамланган стержен эгилиши масаласининг МАС ва СФМ алгоритмлари асосидаги сонли ечимлари қаралган.

3-жадвал

Тугунлар сонининг турли қийматларидаги тақрибий ечимлар

$\max(w(x))$	Аппроксимациялар	$N=20$	$N=40$	$N=80$	$N=160$
$w(0.5)$	ЦРС	-0,082507	-0,149841	-0,189140	-0,202477
	МСФ	-0,205351	-0,206855	-0,207231	-0,207325
$\alpha_1(0.2)$	ЦРС	-0,243920	-0,449456	-0,569412	-0,610122
	МСФ	-0,625017	-0,625017	-0,625017	-0,625017

Солиштиришлар таҳлили шуни кўрсатадики, қаралаётган чегаравий масаланинг МАС аппроксимациядаги тақрибий натижалари $N=80$ бўлганда бир белги аниқликкача яқинлашмоқда. СФМ да эса, $N=20$ да иккита белги аниқликкача яқинлашмоқда, $N=80$ да эса ҳисоб натижалари уч ёки ундан ортиқ белгигача устма-уст тушмоқда. Бундан хулоса қилиш мумкинки, СФМ га асосланган ҳисоблаш алгоритмлари МАС га нисбатан анча аниқ ва турғун ечимга тезроқ яқинлашиш имконини беради.

Ўтказилган сонли тажрибалар ва олинган натижалардан келиб чиқиб хулоса қилиш мумкинки, мураккаб чизиқсиз масалаларни ечиш вақтида, жумладан, чизиқсиз дифференциал тенгламалар системаларини ечишда, СФМ га асосланган ҳисоблаш алгоритмларидан фойдаланиш ўзининг афзалликларини кўрсатади.

Боб якунида, стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини компьютерда ечишнинг сонли реализацияси ҳамда яратилган дастурий мажмуанинг тузилиши тавсифи келтирилган.

Диссертациянинг **«Фазовий такрорий ўзгарувчан юкланишлардаги стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини сонли ечиш»** деб номланган учинчи бобида тўр қадами h нинг турли қийматларида чекли айирмалар усулининг сонли яқинлашишлари тадқиқ этилган ва ўзгарувчан пластикликнинг турли моделлари асосида стерженларнинг физик чизиқсиз масалалари ечилган.

4-масала. Фазовий юкланишдаги икки томони маҳкамланган призматик стержен чегаравий масаласини чекли айирмалар усулида ечиш ва сонли яқинлашишларни тадқиқ этиш.

Стерженнинг геометрик ва механик характеристикалари: $l=2$ *м;* $h_0=0{,}1$ *м;* $b_0=0{,}1$ *м;* $E=2\cdot10^5$ *МПа.* Ташқи кучлар: $z=h_0/2$, $y=b_0/2$ да: $f_1^+=0.1$, $f_2^+=-0.05$, $f_3^+=0.04$ *МПа*; $z=-h_0/2$, $y=-b_0/2$ да: $f_1^-=0.08$, $f_2^-=-0.04$, $f_3^-=0.02$ *МПа.*

4-жадвал

Тўр қадами h нинг турли қийматларидаги кўчишлар

$\max(\vec{V}_i)$	$N=10$	$N=20$	$N=40$	$N=80$	$N=160$
$10^2\cdot W(0{,}5)$	-0,29870	-0,30768	-0,30996	-0,31054	-0,31069
$10^2\cdot V(0{,}5)$	0,44806	0,46151	0,46494	0,46582	0,46604
$10^2\cdot U(0{,}5)$	-0,09000	-0,09000	-0,09000	-0,09000	-0,09000

Жадвалдан кўринадики, $N=40$ бўлганда W ва V кўчиш қийматлари икки белгигача, U нинг қиймати эса, N нинг ихтиёрий қийматларида тўла устма-уст тушмоқда. Солиштиришлар таҳлили шуни кўрсатадики, келгуси тадқиқотларда тўр тугунлари сони N камида 40 олиниши лозим.

5-масала. Ҳар хил текисликларда ўзгарувчан юкланишлар таъсиридаги стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини классификациялаш ва ҳисоб натижалари таҳлили.

Кўп вариантли ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун ташқи кучлар таъсиридаги стерженларнинг 20 та физик чизиқсиз масалалари турли текисликларда классификация қилинган. Математик моделларни шакллантириш ва уларни ечиш жараёнлари автоматлаштирилган. Бунда фойдаланувчи дастурий таъминотнинг мулоқот ойнасидаги вектор компонентларини танлаш билан стерженнинг ихтиёрий текисликдаги физик чизиқсиз масаласини сонли ечимини олиши мумкин.

Мисол сифатида юкланишлар сони $k=1$ ва тугунлар сони $N=40$ бўлганда стерженнинг бир неча хил масалалари геометрик чегаравий шарт $\vec{V}^{(k)}\Big|_{\substack{x=0\\x=l}}=0$ билан қаралган. Стерженнинг геометрик ва механик кўрсаткичлари: l=2.5 *м;* h_0=0.1 *м;* b_0=0.1 *м;* $E=2\cdot10^5$ *МПа*. Ташқи кучлар қийматлари: $f_0^+=1$, $f_0^-=2.5$, $\bar{f}_0^+=0.5$, $\bar{f}_0^-=0.2$ *МПа*.

5-жадвалда кўчиш вектори $\vec{V}_i^{(k)}$ компонентларининг стержен узунлиги бўйича энг катта қийматлари берилган. Итерациялар сони γ қаралаётган масалаларда $3\le\gamma\le5$ оралиқда ётибди.

5-жадвал

Иккинчи тартибли чизиқсиз дифференциал тенгламалар системаларининг тақрибий ечимлари

$\max\left(\vec{V}_i^{(k)}\right)$	Тенгламалар сони (m)				
	m=2, γ=3	m=3, γ=3	m=5, γ=4	m=6, γ=5	m=9, γ=5
W (0,5)	-0,1227786	-0,1231643	-0,1231865	-0,1231860	-0,1232194
α_1 (0,2)	-0,3848242	-0,3848240	-0,3848928	-0,3848915	-0,3849963
β_1 (0,1)		-0,0092280	-0,0092290	-0,0092295	-0,0092319
V (0,5)			-0,1151421	-0,1155015	-0,1155325
α_2 (0,2)			-0,3608797	-0,3608728	-0,3609687
β_2 (0,1)				-0,0086553	-0,0086576
U (0,5)					-0,0008023
θ (0,5)					0,0021804
ν (0,5)					0,0001786

Ҳисоблашлардан кўринадики, стерженларнинг кучланганлик ҳолати унинг қайси текисликда қаралаётганлигига ва бўйлама, кўндаланг ҳамда буровчи кучларнинг биргаликдаги таъсирини ҳисобга олинганлигига бевосита боғлиқ.

6-масала. Ўзгарувчан пластикликнинг турли моделлари асосида стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларининг сонли ечимлари ва таҳлили.

Бу ерда ўзгарувчан пластикликнинг турли моделлари асосида икки томони маҳкамланган призматик стерженнинг $k=2$ ва $k=10$ даги физик чизиқсиз масалаларини сонли ечимлари ва таҳлили қаралган. Тадқиқот объекти сифатида $B-96$ алюминий қотишмасидан тайёрланган стержен олинган.

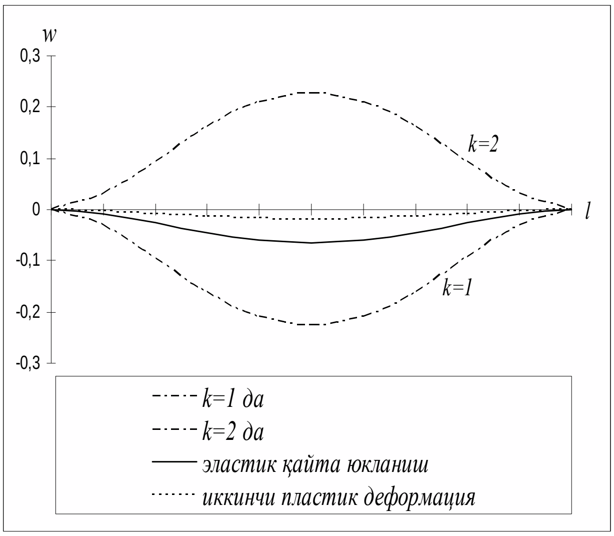
6-жадвал

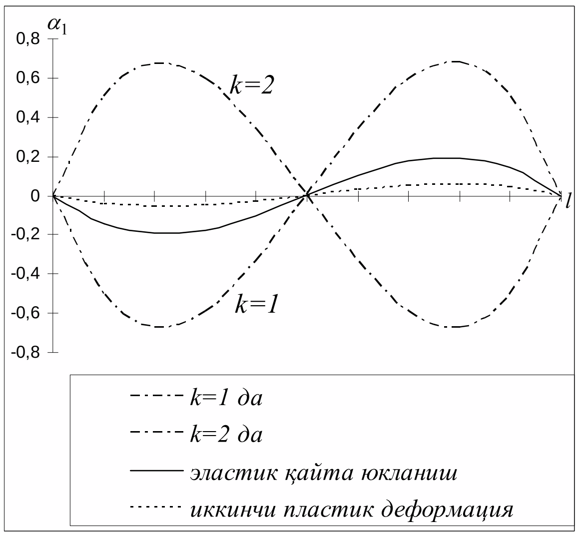
$\vec{V}_i^{(k)}$ нинг турли моделлар асосида олинган қийматлари

$\max\left(\vec{V}_i^{(k)}\right)$	$k=2$			$k=10$		
	Ўзгарувчан пластикликнинг турли моделлари					
	Мазинг-Москвитин (γ=4)	Гусенков-Шнейдерович (γ=4)	Т.Бўриев (γ=5)	Мазинг-Москвитин (γ=3)	Гусенков-Шнейдерович (γ=3)	Т.Бўриев (γ=4)
$W^{(k)}(0.5)$	0,274187	0,274189	0,274398	0,274144	0,274132	0,274375
$\alpha_1^{(k)}(0.3)$	0,722022	0,722027	0,722560	0,721904	0,721872	0,722499
$\beta_1^{(k)}(0.1)$	0,019853	0,019854	0,019871	0,019851	0,019851	0,019869
$V^{(k)}(0.5)$	0,257083	0,257084	0,257279	0,257043	0,257030	0,257261
$\alpha_2^{(k)}(0.3)$	0,676963	0,676968	0,677462	0,676851	0,676819	0,677415
$\beta_2^{(k)}(0.1)$	0,018617	0,018618	0,018634	0,018615	0,018615	0,018632
$U^{(k)}(0.5)$	0,001720	0,001720	0,001721	0,001719	0,001719	0,001721
$\theta^{(k)}(0.5)$	-0,003633	-0,003633	-0,003633	-0,003633	-0,003633	-0,003633
$\nu^{(k)}(0.1)$	-0,000300	-0,000300	-0,000305	-0,000298	-0,000297	-0,000304

7-масала. Эластик қайта юкланиш ва иккинчи пластик деформацияларни ҳисобга олган ҳолда стерженларнинг чизиқсиз масаласини ечиш.

Эластик қайта юкланиш ва иккинчи пластик деформацияларни аниқлаш, ўзгарувчан юкланишлардаги стерженларнинг кучланганлик ҳолатини алоҳида кўринишларини сифатий тавсифлаш имконини беради. Олинган ўлчовсиз натижалар график кўринишда келтирилган (3-расм).





3-расм. k=1 **ва** 2 **да кўчиш вектори компонентлари қийматлари**

8-масала. Турли чегаравий шартларда фазовий ўзгарувчан юкланишлардаги стерженларнинг кучланганлик ҳолатини материалда юзага келадиган емирилишларни ҳисобга олган ҳолда тадқиқ этиш.

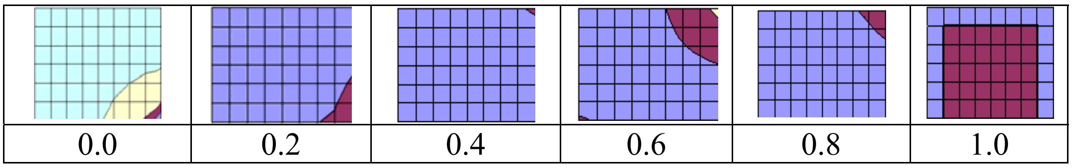
Қаралаётган масала геометрик, аралаш ва статик чегаравий шартлар билан ечилган. 7-жадвалда k =1 ва 20 юкланишлардаги стерженнинг пластиклик функцияси $\omega^{(k)}$, емирилиш функцияси $\eta^{(k)}$, деформацияланиш интенсивлиги $\bar{\varepsilon}_u^{(k)}(\eta)$ ва кучланиш интенсивлиги $\bar{\sigma}_u^{(k)}(\eta)$ қийматлари келтирилган. Ҳисоб натижалари стержен кўндаланг кесимининг $y=0$, $z=h_0$ координатасига тегишли.

7-жадвал

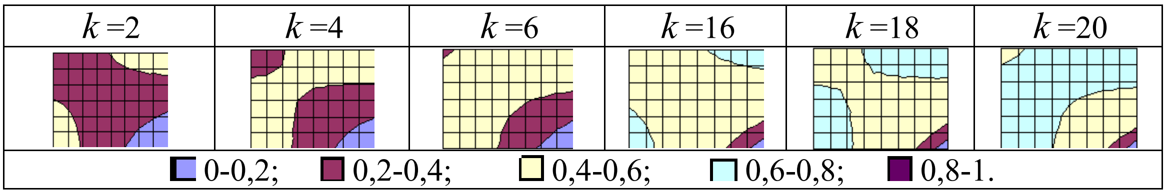
Фазовий такрорий ўзгарувчан юкланишлардаги стерженнинг кучланганлик ҳолати

k	x	$\omega^{(k)}(\eta)$	$\eta^{(k)}$	$\bar{\varepsilon}_u^{(k)}(\eta)$	$10^{-3}\bar{\sigma}_u^{(k)}(\eta)$
k=1	0.0	0,719873	0,000000	0,006192	3,659220
	0.6	0,379451	0,000000	0,002497	3,289760
	1.0	0,089999	0,000000	0,001656	3,205700
k=20	0.0	0,688097	0,027085	0,006196	4,081510
	0.6	0,301031	0,024363	0,002500	3,711940
	1.0	0,000000	0,022425	0,001659	3,627850

4-расмда стерженнинг x=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ва 1.0 кўндаланг кесимларидаги пластик соҳалар кўрсатилган. 5-расмда эса k=2,4,6,…,20 да стерженнинг x=0.0 кўндаланг кесимидаги пластик соҳаларнинг ўзгариши кўрсатилган.

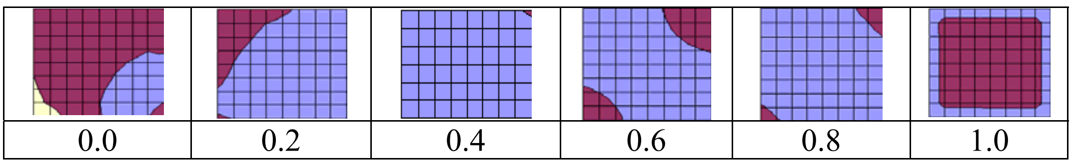


4-расм. k=1 **да стержен кўндаланг кесими бўйича ноэластик соҳалар**

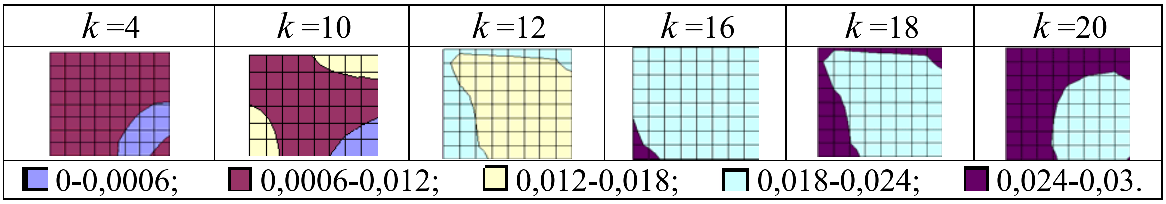


5-расм. Такрорий юкланишларда стержен кўндаланг кесими (x=0**) даги ноэластик соҳаларнинг ўзгариши**

6-расмда стерженнинг x=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ва 1.0 кўндаланг кесимларидаги емирилиш соҳалари кўрсатилган. 7-расмда эса, k=2,4,6,…,20 да стерженнинг x=0.0 кўндаланг кесимидаги емирилиш соҳаларининг ўзгариши кўрсатилган.



6-расм. k=2 **да стержен кўндаланг кесими бўйича емирилиш соҳалари**



7-расм. Такрорий юкланишларда стержен кўндаланг кесими (x=0) даги емирилиш соҳаларининг ўзгариши

Сонли тажриба натижалари шуни кўрсатадики, юкланишлар сонининг ортиши билан стержен кўндаланг кесимларида пластиклик ва емирилиш функциялари қийматлари ортиб бормоқда, бу эса ўз навбатида стерженнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати кинетикасига таъсир этади.

ХУЛОСА

«Фазовий ўзгарувчан юкланишлардаги стерженларнинг физик чизиқсиз масалаларини ечишнинг математик моделлари ва алгоритмлари» мавзусидаги диссертация бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Материалларнинг емирилишини ҳисобга олган ҳолда Лагранж вариацион тамойили ва В.Қ.Қобуловнинг аниқлаштирилган назарияси асосида стерженларнинг физик чизиқсиз масалалари учун математик моделлар ишлаб чиқилди. Мазкур моделлар бўйлама, кўндаланг ва буровчи кучларнинг биргаликдаги таъсирини ҳисобга олган ҳолда стерженларнинг чизиқсиз деформацияланиш жараёнларини тўла ифодалашга хизмат қилади.

2. Фазовий такрорий юкланишлардаги стерженларнинг кучланганлик ҳолатларини ҳисоблашнинг жорий ва ўзгарувчан координаталар системалари учун табиий чегаравий шартли иккинчи тартибли дифференциал тенгламалар системалари орқали ифодаланувчи кўп параметрли математик моделлари ишлаб чиқилди. Ушбу моделлар стерженларнинг такрорий юкланишларидаги кучланганлик ҳолатларини турли ёндашувлар асосида сонли ҳисоблаш имконини беради.

3. Чекли айирмалар усули ва итерацион жараёнлар асосида ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилди. Мазкур алгоритмлар асосида тест масалалар ечилди ва олинган сонли натижалар ишончлилик, аниқлик ва турғунлик мезонлари бўйича баҳоланди. Шунингдек, тўр қадами h нинг турли қийматларида сонли ҳисоблаш натижалари таҳлил этилди ва ҳисоблаш алгоритмларининг турғунлиги текширилди. Натижалар ишончлилиги аниқ ва тақрибий ечимларни солиштириш йўли билан асослаб берилди. Ҳисоблаш алгоритмлари тугунлар сони N=40 бўлганда белгиланган аниқлик ε бўйича турғун ечимга яқинлашиш имконини беради.

4. Турли аппроксимацияли ҳисоблаш алгоритмлари тадқиқ этилди. Олинган сонли натижалар таҳлили шуни кўрсатдики, марказий чекли айирмали схемали аппроксимацияларга асосланган ҳисоблаш алгоритмларига нисбатан, чекли айирмалар усулининг А.А.Самарский-И.В.Фрязинов модификацияси асосида ишлаб чиқилган алгоритмларининг

ҳисоблаш тезлиги 2 марта ва аниқлик даражаси 27 % га юқори. Ушбу ҳисоблаш алгоритмларидан фойдаланиш турғун ечимга янада тез яқинлашиш имконини беради.

5. Стерженларнинг физик чизиқсиз масалалари учун геометрик, статик ва аралаш чегаравий шартлар скаляр ва вектор кўринишларида ишлаб чиқилди. Бу эса лойиҳалаш амалиётида учрайдиган ҳаётий масалаларни аниқ ва айнан тадқиқ этишга хизмат қилади.

6. Ишлаб чиқилган самарали ҳисоблаш алгоритмларининг компьютер реализацияси ва дастурий таъминотлари яратилди. Стержен типидаги конструкция материалларининг лойиҳа ҳисоб ишлари учун амалиётда кўл келадиган йигирмата физик чизиқсиз масалалари расмийлаштирилиб, улар устида сонли тажрибалар ўтказилди. Бунда n ($n=2,3,...9$) параметрга боғлиқ n та чизиқсиз дифференциал тенгламалар системалари ечилди. Сонли натижалар таҳлили шуни кўрсатдики OX, OY ва OZ ўқлари бўйича кўчиш векторининг барча параметрларини ҳисобга олган ҳолда тўққизта чизиқсиз иккинчи тартибли дифференциал тенгламалар системасини ечиш – қаралаётган объектнинг физик-механик хусусиятлари ва кучланганлик ҳолатларини тўла ифодалаш имконини берди. Бу эса ўз навбатида муҳандис-лойиҳачиларга тегишли амалий таклиф ва тавсиялар беришда фундаментал асос бўлиб хизмат қилади.

7. Мазинг-Москвитин тамойили асосида эластик қайта юкланиш ва иккинчи пластик деформацияларни ҳисобга олган ҳолда стерженларнинг чизиқсиз масалалари ечилди. Мазкур тадқиқотлар материалларда юзага келадиган қолдиқ деформацияларни баҳолаш ва амалий хулосалар ишлаб чиқиш имконини беради.

8. Ўзгарувчан пластикликнинг турли моделлари асосида фазовий такрорий ўзгарувчан юкланишлардаги стерженларнинг чизиқсиз масалалари ечилди. Жорий ва ўзгарувчан координаталар системаларида олинган математик моделлар турли чегаравий шартларда тадқиқ этилди. Мазкур тадқиқотлар стержен кўндаланг кесимларида юзага келаётган ноэластик соҳалар, уларнинг такрорий юкланишлардаги ўзгариш қонуниятлари, материалларнинг зарарланиши, емирилиш (бузилиш) ҳолатларини тўла ифодаловчи сонли натижалар билан ишлаш имконини беради.

9. Ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритмлари, математик моделлар ва дастурий таъминот «Tashkent metroproekt», “Techno engineering expert” ва “Zamin dizayn” масъулияти чекланган жамиятлари объектларида лойиҳа ҳисоб ишларини амалга оширишда қўлланилган. Илмий тадқиқот натижалари лойиҳа ҳисоб ишлари учун вақт сарфини 2 марта тежаш ҳамда ҳисоблаш хатолигини 18% гача камайтириш имконини берган. Бу эса лойиҳа жараёнининг сифати ва тезлигини оширишга хизмат қилади.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.Т.07.01
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

НАМАНГАНСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

ИСОМИДДИНОВ АНВАРЖОН ИНОМЖОНОВИЧ

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННО ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ

Ташкент – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.2.PhD/T194.

Диссертация выполнена в Наманганском инженерно-строительном институте.

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

Научный руководитель:	**Юлдашев Таджимат** доктор технических наук
Официальные оппоненты:	**Хужаев Исматулла Кушаевич** доктор технических наук
	Расулмухамедов Махамадазиз Махамадаминович кандидат физико-математических наук, доцент
Ведущая организация:	**Ташкентский химико-технологический институт**

Защита диссертации состоится «____» _____________ 2018 года в ______ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.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 (зарегистрирована за № _____). Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44.

Автореферат диссертации разослан «____» _____________ 2018 года.

(реестр протокола рассылки № ____ от «____» _____________ 2018 года).

Р. Х. Хамдамов
Председатель научного совета по присуждению
ученых степеней, д.т.н., проф.

Ф. М. Нуралиев
Ученый секретарь научного совета по
присуждению ученых степеней, д.т.н.

Н. Равшанов
Председатель научного семинара при научном
совете по присуждению ученых степеней, д.т.н.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире особое внимание уделяется созданию и усовершенствованию автоматизированных систем для оценки физико-механических свойств материалов, используемых при проектировании сооружений и конструкций. В связи с этим, сильно развивается направление эффективной организации работы проектирования на основе современных компьютерных технологий. В развитых странах мира, в том числе в США, Японии, Италии, Китае, Турции, Индии, России и др., важное значение имеют задачи создания математических моделей, алгоритмов, а также программного обеспечения для численного вычисления процессов деформирования конструкционных материалов.

В мировом масштабе проводятся научные исследования, направленные на развитие и разработку обобщенных математических моделей, построение вычислительных алгоритмов, решение линейных и физически нелинейных задач конструкционных материалов при сложном нагружении. В этой связи, важнейшими задачами считаются создание компьютерных моделей и автоматизированных систем оценки совместного действия продольных, поперечных и крутильных сил на конструкционные материалы типа стержней, обоснование возникающих пластических зон в поперечных сечениях материала, определение состояния повреждаемости материалов при воздействии пространственно повторном нагружении.

В нашей республике проводятся широкомасштабные мероприятия по проектированию сооружений и математического моделирования процессов вычисления, разработке эффективных вычислительных алгоритмов и созданию автоматизированных специальных программных обеспечений, служащих для оценки напряженного состояния конструкций, а также для принятия самых приемлемых технических и технологических решений с использованием современных компьютерных технологий. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены задачи, в частности « … проектирование и модернизация дорожно-транспортных, инженерно-коммуникационных и социальной инфраструктуры, … внедрение информационно-коммуникационных технологий»[1]. При выполнении этих задач одним из важных вопросов является широкое применение современных информационных технологий к процессу проектирования, разработки многопараметрических обобщенных математических моделей, эффективных вычислительных алгоритмов и специальных автоматизированных систем, обеспечивающих решение физически нелинейных задач стержней при воздействии сложных внешних сил с учетом повреждаемости материалов.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики

[1] Указ Президента Республики Узбекистан “О стратегии действий по дальнейшему Развитию Республики Узбекистан” ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года.

Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-1989 от 27 июня 2013 г. «О мерах по дальнейшему развитию Национальной информационно-коммуникационной системы Республики Узбекистан», Постановлении Кабинета Министров Республики Узбекистан № 24 от 1 февраля 2012 г. «О мерах по созданию условий для дальнейшего развития компьютеризации и информационно-коммуникационных технологий на местах» и других нормативно-правовых документах, принятые 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. «Развитие информатизации и информационно-коммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. Научные исследования по моделированию процессов деформирования элементов конструкций типа стержней при воздействии внешних сил проведены, такими крупными учеными мира, как M.Petrangeli, P.P.Emilio, J.Colin, A.Fatemi, Y.Xiao, Y.Liu, H.Yang, A.S.Andras, R.F.Yьkseler, T.Huang, T.C.Duan, L.X.Li, T.XIA, W.YAO, J.ZOU, D.GAO, J.Sujuan, L.Jun, H.Hongxing, Sh.Rongying, T.Cenk, F.Jerome, E.J.Sapountzakis, V.G.Mokos, I.N.Vasserman, I.N.Shardakov, W.Yao, M.Jianwei, G.Vasudevan, S.Kothandaraman, S.Azhagarsamy, Г.Ю.Джанелидзе, В.З.Власов, В.В.Болотин, Д.Л.Быков, В.Г.Баженов, В.С.Бондарь, В.Г.Зубчанинов, А.А.Ильюшин, Д.Д.Ивлев, Л.М.Качанов, Ю.Г.Коротких, И.А.Кийко, В.В.Москвитин, Н.Н.Малинин, В.И.Мяченков, Б.Е.Победря, Ю.Н.Работнов и др. Понятие функции повреждаемости и ее модели введены В.В.Болотиным, Л.М.Качановым, Ю.Н.Работновым, А.А.Ильюшиным и В.В.Москвитиным.

В нашей стране рядом ученых проведены научно-исследовательские работы по совершенствованию теоретических основ и развитию разработки методов расчета стержневых систем, в том числе, академиком В.К. Кабуловым разработана уточненная теория линейных и нелинейных процессов деформирования элементов конструкций и предложен алгоритмический подход к решению прикладных задач. Вопросы алгоритмизации и автоматизации решений задач механики сплошных сред в Узбекистане впервые были поставлены академиком В.К.Кабуловым, и далее усовершенствованы учеными: Т.Буриевым, К.Ш.Бобомуродовым, Ф.Б.Бадаловым, Н.Мухитдиновым, Б.Курманбаевым, Х.Эшматовым, И.Алимовым, Т.Юлдашевым, Б.Мардоновым, А.Холжигитовым, Ш.А.Назировым, А.М.Полатовым и их последователями.

Проведенный анализ исследований в этой области показывает, что проблемы моделирования процессов физически нелинейного деформирования стержней с учетом повреждаемости материалов и создание автоматизированных систем вычислений до сих пор достаточно не решены. Поэтому возникает необходимость моделирования нелинейных процессов деформирования тонкостенных стержней при пространственно переменном нагружении на основе уточненной теории, разработки эффективных вычислительных методов и алгоритмов, а также создания программного обеспечения.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствие с планом научно-исследовательских работ Наманганского инженерно-строительного института и Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта Ф4–003 «Разработка численных методов исследования процессов деформирования и повреждаемости вязкоупруго-пластических систем при переменных нагружениях» фундаментального гранта (2012-2016).

Целью исследования является разработка математических моделей, эффективных вычислительных алгоритмов и программного обеспечения процессов физически нелинейного деформирования стержней при пространственно переменном нагружении с учетом повреждаемости материалов.

Задачи исследования:

построение математических моделей нелинейных процессов деформирования стержней при совместном действии продольных, поперечных и крутильных сил;

разработка многопараметрических математических моделей исследования напряженного состояния стержней при пространственно циклическом нагружении для текущих и фиктивных координатных систем;

разработка геометрических, статических и смешанных граничных условий в векторном и скалярном виде для физически нелинейных задач стержней при сложном нагружении;

разработка численных вычислительных алгоритмов на основе метода конечных разностей и итерационных процессов;

разработка механизмов оценки погрешности и численного исследования разработанных вычислительных методов и алгоритмов на основе критериев точности и устойчивости;

усовершенствование вычислительных алгоритмов по выбору эффективного метода вычисления и численного исследования с различными значениями шага сетки;

создание автоматизированных систем и комплексных алгоритмов решения физически нелинейных задач стержней в различных граничных условиях при воздействии сложных нагружений;

усовершенствование механизмов проведения вычислительных экспериментов, описания результатов и определения новых эффектов, связанных с физическими нелинейностями.

Объектом исследования являются процессы исследования напряженно деформированного состояния стержней при пространственно повторно-переменном нагружении с учетом функции пластичности и повреждаемости.

Предмет исследования составляют математические модели, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение для исследования нелинейных процессов деформирования элементов конструкций типа стержней при воздействии сложного пространственного нагружения.

Методы исследования. В процессе исследования при решении физически нелинейных задач стержней использованы вариационный принцип Лагранжа, конечные разности, центральные разностные схемы, аппроксимации по модификации А.А.Самарского-И.В.Фрязинова, упругое решение А.А.Ильюшина, методы вычислительной математики и методология алгоритмизации.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

на основе уточненной теории В.К.Кабулова и вариационного принципа разработаны математические модели для решения физически нелинейных задач стержней при воздействии сложных внешних сил с учетом повреждаемости материалов;

разработаны многопараметрические математические модели в виде системы из девяти нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с естественными граничными условиями исследования напряженного состояния стержней при пространственно повторном нагружении в текущих и фиктивных координатных системах;

по методу упругого решения А.А.Ильюшина разработаны вычислительные алгоритмы решения физически нелинейных задач стержней с различными аппроксимациями на основе центральной разностной схемы и модификации А.А.Самарского-И.В.Фрязинова метода конечных разностей;

разработаны эффективные вычислительные алгоритмы, обеспечивающие быстрое приближение к устойчивому решению, высокую степень точности, направленные к численному вычислению некоторых физически нелинейных задач стержней, описываемые математическими моделями многопараметрических дифференциальных уравнений;

создана автоматизированная система, позволяющая сформировать и решить на компьютере физически нелинейные задачи стержней при различных переменных нагружениях и плоскостях с геометрическими, статическими и смешанными граничными условиями.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны различные математические модели стержней с учетом физической нелинейности для текущих и фиктивных координатных систем;

построены эффективные вычислительные алгоритмы метода конечных разностей;

исходя от состояния применения в практике стержней при переменном нагружении, разработаны геометрические, смешанные и статические граничные условия;

согласно применению стержней в практике, сформулированы двадцать физически нелинейных задач с учетом повреждаемости и нелинейного деформирования материалов;

создан программный комплекс, позволяющий автоматизировать процессы формирования расчетных моделей на компьютере и численного решения для многовариантных краевых задач стержней.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования обосновывается корректностью постановки задачи на основе вариационного принципа Лагранжа, строгостью математических выкладок с использованием обоснованных численных методов и эффективных вычислительных алгоритмов, а также сравнением полученных приближенных решений с точными.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в том, что предложена методика математического моделирования широкого круга новых задач в области нелинейных процессов деформирования стержневых систем, созданы универсальные и эффективные вычислительные алгоритмы на основе численно-аналитических методов, а также разработана автоматизированная система.

Практическая значимость результатов исследования обосновывается уменьшением временных и материальных затрат, повышением качества выполненных работ и производительности труда при проведении проектных расчетов конструкций типа стержней при воздействии пространственных повторно-переменных внешних сил, а также эффективным проведением процессов проектирования.

Внедрение результатов исследования. На основе созданных математических моделей, алгоритмов и программных комплексов по решению физически нелинейных задач стержней с учетом функции пластичности и повреждаемости, а также оценки напряженного состояния материалов:

математические модели в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, разработанные на основе вариационного принципа, вычислительные алгоритмы и комплексы программ внедрены на объектах предприятий ООО «Tashkent metroproekt», ООО «Techno engineering expert» и ООО «Zamin dizayn» (справка по внедрению Государственного комитета по архитектуре и строительству №164/02-13 от 09.01.2018 г.). Результаты научных исследований за счет сокращения срока вычислительного процесса в 2 раза и уменьшения погрешности вычислений на 18 % дали возможность повысить качество и скорость общих проектных процессов;

разработанные математические модели для физически нелинейных задач стержней при пространственно повторно переменном нагружении в текущих и фиктивных координатных системах, вычислительные алгоритмы и комплексы программ внедрены в процесс проектирования сооружений метрополитена Ташкента со стороны ООО «Tashkent metroproekt» (справка по внедрению Государственного комитета по архитектуре и строительству №164/02-13 от 09.01.2018 г.). Результаты научных исследований, т.е.

разработанное программное обеспечение дало возможность повысить эффективность проектных работ сооружений метрополитена на 12-18 %;

разработанные вычислительные алгоритмы на основе модификации А.А.Самарского-И.В.Фрязинова метода конечных разностей для системы нелинейных дифференциальных уравнений с естественными граничными условиями внедрены в процесс проектирования строительно-монтажных работ со стороны ООО «Techno engineering expert» (справка по внедрению Государственного комитета по архитектуре и строительству №164/02-13 от 09.01.2018 г.). Результаты исследований, т.е. созданные вычислительные алгоритмы дали возможность улучшения начальных расчетных работ элементов конструкций на заметном уровне, в том числе, повышения точности вычислений в 1,2 раз, а также качества и скорости процессов проектирования до 15-20 %;

автоматизированная система, обеспечивающая вычисление физически нелинейных задач стержней и анализа численных результатов с учетом совместного действия продольных, поперечных и крутильных сил, внедрена в процесс проектно-расчетных работ со стороны ООО «Zamin dizayn» (справка по внедрению Государственного комитета по архитектуре и строительству №164/02-13 от 09.01.2018 г.). Результаты исследований, т.е. созданная автоматизированная система дала возможность уменьшения погрешности вычислений до 18 % и повышения эффективности проектирования до 25 %.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 9 международных и 10 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 38 научных работ. Из них 1 монография, 16 научных статей, в том числе, 1 в зарубежном и 15 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, а также получено 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Обозначены цель и задачи, описываны объект и предмет исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов исследования на практике, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«Анализ состояния изученности проблемы. Математическое моделирование нелинейных процессов деформирования элементов конструкций»** приведен обзор литературных источников по математическому моделированию нелинейных процессов деформирования и повреждаемости элементов конструкций типа стержней.

На основе уточненной теории В.К.Кабулова выражения для перемещения точек стержня при пространственно переменном нагружении с учетом совместного действия продольных, поперечных и крутильных сил можно представить в виде:

$$\begin{aligned} u_1^{(k)} &= U^{(k)} - z\alpha_1^{(k)} - y\alpha_2^{(k)} + \varphi\nu^{(k)} + a_1\beta_1^{(k)} + a_2\beta_2^{(k)}, \\ u_2^{(k)} &= V^{(k)} + z\theta^{(k)}, \quad u_3^{(k)} = W^{(k)} - y\theta^{(k)}, \end{aligned} \tag{1}$$

где $U^{(k)}$, $V^{(k)}$, $W^{(k)}$ – перемещения центральной линии стержня; $\alpha_1^{(k)}$, $\alpha_2^{(k)}$ – углы наклона касательной к упругой линии при чистом изгибе; $\beta_1^{(k)}$, $\beta_2^{(k)}$ – углы поперечного сдвига; $\theta^{(k)}$ – угол закручивания; $\nu^{(k)}$ – погонный угол закрутки при k-ом нагружении в текущих координатных системах; a_1, a_2 – заданные функции; φ – функция кручения.

Согласно формуле Коши с учетом (1) определяются компоненты деформации при k-ом нагружении:

$$\varepsilon_{11}^{(k)} = \frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial x},\ \varepsilon_{12}^{(k)} = \frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial y} + \frac{\partial u_2^{(k)}}{\partial x},\ \varepsilon_{13}^{(k)} = \frac{\partial u_1^{(k)}}{\partial z} + \frac{\partial u_3^{(k)}}{\partial x},\ \varepsilon_{22}^{(k)} = \varepsilon_{33}^{(k)} = \varepsilon_{23}^{(k)} = 0. \tag{2}$$

В текущих и фиктивных координатных системах, компоненты напряжений и деформаций при k-ом нагружении, связаны следующим образом (рис. 1):

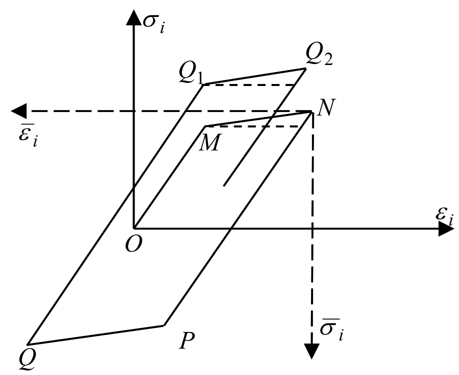


Рис.1. Процессы циклического деформирования в текущих и фиктивных координатах

1. По обобщенной теории Т.Буриева (*диаграмма деформирования в текущих координатных системах*):

$$\left.\begin{aligned}
&\sigma_{11}^{(k)} = E\left[\left(1-\omega^{(k)}\right)\varepsilon_{11}^{(k)} - \omega^{(k)}\varepsilon_{11}^{0(k-1)} + \sum_{m=1}^{k-1}\omega^{0(k-m)}\left(\varepsilon_{11}^{0(k-m)} - \varepsilon_{11}^{0(k-m-1)}\right)\right],\\
&\sigma_{12}^{(k)} = G\left[\left(1-\omega^{(k)}\right)\varepsilon_{12}^{(k)} - \omega^{(k)}\varepsilon_{12}^{0(k-1)} + \sum_{m=1}^{k-1}\omega^{0(k-m)}\left(\varepsilon_{12}^{0(k-m)} - \varepsilon_{12}^{0(k-m-1)}\right)\right],\\
&\sigma_{13}^{(k)} = G\left[\left(1-\omega^{(k)}\right)\varepsilon_{13}^{(k)} - \omega^{(k)}\varepsilon_{13}^{0(k-1)} + \sum_{m=1}^{k-1}\omega^{0(k-m)}\left(\varepsilon_{13}^{0(k-m)} - \varepsilon_{13}^{0(k-m-1)}\right)\right],\\
&\sigma_{22}^{(k)} = \sigma_{33}^{(k)} = \sigma_{23}^{(k)} = 0,
\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

здесь при $k=1$, получим $\varepsilon_{11}^{0(0)}=0$; $\varepsilon_{12}^{0(0)}=0$ и $\varepsilon_{13}^{0(0)}=0$, где E – модуль упругости; G – модуль сдвига; функция пластичности – $\omega^{(k)}$ вычисляется по следующим формулам:

при $k=1$, $\omega^{(1)} = \begin{cases} 0, & \varepsilon_1^{(1)} < 1, \\ \lambda\left(1-\dfrac{1}{\varepsilon_1^{(1)}}\right), & \varepsilon_1^{(1)} \ge 1; \end{cases}$ а при $k \ge 2$, $\omega^{(k)} = \begin{cases} 0, & \varepsilon_1^{(k)} < \alpha_k, \\ \lambda\left(1-\dfrac{\alpha_k}{\varepsilon_1^{(k)}}\right), & \varepsilon_1^{(k)} \ge \alpha_k; \end{cases}$

здесь $\varepsilon_1^{(k)} = \dfrac{\varepsilon_i^{(k)}}{\varepsilon_s}$, $\varepsilon_i^{(k)} = \dfrac{2}{3}\sqrt{\left(\varepsilon_{11}^{(k)}\right)^2 + \dfrac{3}{4}\left(\left(\varepsilon_{12}^{(k)}\right)^2 + \left(\varepsilon_{13}^{(k)}\right)^2\right)}$ при $k=1,2,...,kk$ (kk – ограничения числа нагружений), циклические свойства материала α_k вычисляются в виде:

$$\alpha_k = Q(k-1)^{\wp},$$

здесь Q, $\wp$ - константы материала.

2. По обобщенному принципу Мазинга-Москвитина (*диаграмма деформирования в фиктивных координатных системах*):

$$\bar{\sigma}_{11}^{(k)} = 3G\left(1-\omega^{(k)}\right)\bar{\varepsilon}_{11}^{(k)},\ \bar{\sigma}_{12}^{(k)} = G\left(1-\omega^{(k)}\right)\bar{\varepsilon}_{12}^{(k)},\ \bar{\sigma}_{13}^{(k)} = G\left(1-\omega^{(k)}\right)\bar{\varepsilon}_{13}^{(k)}, \quad (4)$$

здесь $\bar{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = \varepsilon_{ij}^{(k)}\ (i=j=1,2,3)$, $\bar{\sigma}_{ij}^{(k)}$ и $\bar{\varepsilon}_{ij}^{(k)}$– напряжения и деформации при k-ом нагружении в фиктивных координатных системах.

Следуя В.В.Москвитина, функция повреждаемости материала $\eta(x,y,z)$, учитывающая все нагружения и деформирования при циклических нагружениях и условиях $\eta(0)=0$ и $\eta(N)=1$, определяется следующими кинетическими уравнениями:

$$\frac{d\eta}{dk} = A\left(\bar{\sigma}_u^{(k)}\right)^{\alpha}\left(1-\gamma\eta_k\right)^{-\beta} \quad \text{или} \quad \eta = \int_0^k F(k-m)\psi\left(\sigma_u^{(k)}\right)dm; \quad (5)$$

здесь A, α, β, γ – константы; N – число полуциклов до наступления предельного состояния (разрушения); $\bar{\sigma}_u^{(k)}$ – интенсивность напряжений.

При учете накопления повреждений функция пластичности $\omega_{(x,y,z)}^{(k)}(\eta)$ определяется так:

$$\omega_{(x,y,z)}^{(k)}(\eta)=\begin{cases}0, & \varepsilon_u^{(k)} \le \bar{\varepsilon}_s^{(k)}(\eta),\\ \lambda_k\left(1-\dfrac{\bar{\varepsilon}_s^{(k)}(\eta)}{\bar{\varepsilon}_u^{(k)}}\right), & \varepsilon_u^{(k)} > \bar{\varepsilon}_s^{(k)}(\eta).\end{cases} \tag{6}$$

По обобщенной диаграмме деформирования Гусенкова-Шнейдеровича циклические свойства характеристики материала определяется следующим образом:

для циклически упрочняющихся материалов

$$g_k=\left[1+\frac{A^*}{2G}\frac{1}{(k-1)^{\alpha}}+\frac{1}{2G(k-1)^{\alpha}}\left(\frac{A-A^*}{2}-(-1)^k\frac{A-A^*}{2}\right)\right]^{-1};$$

для циклически разупрочняющихся материалов

$$g_k=\left[1+\frac{A^*}{2G}\exp(\beta(k-1))+\frac{1}{2G}\exp(\beta(k-2))\left(\frac{A-A^*}{2}-(-1)^k\frac{A-A^*}{2}\right)\right]^{-1}.$$

Математические модели нелинейных задач стержней с учетом повреждаемости материалов разрабатываются на основе вариационного принципа Лагранжа:

$$\delta(-\Pi+A)=0. \tag{7}$$

Вариации потенциальной энергии $\delta\Pi$ и работы внешних сил δA имеют вид:

$$\delta\Pi=\int_V\sum_{i=1}^{3}\sigma_{1i}^{(k)}\delta\varepsilon_{1i}^{(k)}dV=\int_V\left[\sigma_{11}^{(k)}\delta\varepsilon_{11}^{(k)}+\sigma_{12}^{(k)}\delta\varepsilon_{12}^{(k)}+\sigma_{13}^{(k)}\delta\varepsilon_{13}^{(k)}\right]dV,$$

$$\delta A=\int_V\sum_{i=1}^{3}P_i^{(k)}\delta u_i^{(k)}dV+\int_S\sum_{i=1}^{3}f_i^{(k)}\delta u_i^{(k)}dS+\int_F\sum_{i=1}^{3}q_i^{(k)}\delta u_i^{(k)}dF\bigg|_x,$$

здесь $P_i^{(k)}$, $f_i^{(k)}$ и $q_i^{(k)}$ – соответственно объемные, поверхностные и торцевые составляющие силы при k-ом нагружении.

На основе вариационного принципа Лагранжа, разработаны математические модели для физически нелинейных задач стержней при пространственно переменном нагружении, описываемых системами нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с естественными граничными условиями в векторной форме:

1. Математическая модель в текущих координатных системах:

$$\frac{d}{d\bar{x}}\left[\left(A^u-A^{p(k)}\right)\frac{d\vec{V}^{(k)}}{d\bar{x}}+\left(B^u-B^{p(k)}\right)\vec{V}^{(k)}\right]+\left(C^u-C^{p(k)}\right)\frac{d\vec{V}^{(k)}}{d\bar{x}}+$$
$$+\left(D^u-D^{p(k)}\right)\vec{V}^{(k)}=\vec{F}^{(k)}+$$
$$+\frac{d}{d\bar{x}}\left[A^{p(k)}\frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{d\bar{x}}+B^{p(k)}\vec{V}^{0(k-1)}\right]+C^{p(k)}\frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{d\bar{x}}+D^{p(k)}\vec{V}^{0(k-1)}+$$

$$+\sum_{m=1}^{k-1}\left\{\frac{d}{d\bar{x}}\left[A^{po(k-m)}\frac{d}{d\bar{x}}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)+B^{po(k-m)}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)\right]+\right.$$

$$\left.+C^{po(k-m)}\frac{d}{d\bar{x}}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)+D^{po(k-m)}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)\right\} \tag{8}$$

и соответственно, граничные условия

$$\left\{\left(A^{u}-A^{p(k)}\right)\frac{d\vec{V}^{(k)}}{d\bar{x}}+\left(B^{u}-B^{p(k)}\right)\vec{V}^{(k)}-\vec{Q}^{(k)}-\right.$$

$$-A^{p(k)}\frac{d\vec{V}^{0(k-1)}}{d\bar{x}}-B^{p(k)}\vec{V}^{0(k-1)}-\sum_{m=1}^{k-1}\left[A^{po(k-m)}\frac{d}{d\bar{x}}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)+\right.$$

$$\left.\left.+B^{po(k-m)}\left(\vec{V}^{0(k-m)}-\vec{V}^{0(k-m-1)}\right)\right]\right\}\delta\vec{V}^{(k)}\Big|_{\Gamma}=0; \tag{9}$$

где $\vec{F}^{(k)}$, $\vec{Q}^{(k)}$ – векторы внешних сил; $\vec{V}^{(k)}$ – искомый вектор функции девятого порядка $\left(\vec{V}^{(k)}=\left|W^{(k)},\alpha_1^{(k)},\beta_1^{(k)},V^{(k)},\alpha_2^{(k)},\beta_2^{(k)},U^{(k)},\theta^{(k)},\nu^{(k)}\right|^{T}\right)$.

2. Математические модели физически нелинейных задач стержней при пространственно переменном нагружении в фиктивных координатных системах:

$$\frac{d}{d\bar{x}}\left[\left(A^{u}-A^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\bar{V}}^{(k)}}{d\bar{x}}+\left(B^{u}-B^{p(k)}\right)\vec{\bar{V}}^{(k)}\right]+\left(C^{u}-C^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\bar{V}}^{(k)}}{d\bar{x}}+$$

$$+\left(D^{u}-D^{p(k)}\right)\vec{\bar{V}}^{(k)}=\vec{F}^{(k)}, \tag{10}$$

$$\left\{\left(A^{u}-A^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\bar{V}}^{(k)}}{d\bar{x}}+\left(B^{u}-B^{p(k)}\right)\vec{\bar{V}}^{(k)}-\vec{Q}^{(k)}\right\}\delta\vec{\bar{V}}^{(k)}\Big|_{\Gamma}=0. \tag{11}$$

где A^{u}, B^{u}, C^{u}, D^{u} – квадратные матрицы девятого порядка с постоянными коэффициентами; $A^{p(k)}$, $B^{p(k)}$, $C^{p(k)}$, $D^{p(k)}$ – квадратные матрицы девятого порядка с переменными коэффициентами.

Для определения истинных значений параметров воспользуемся следующей формулой:

$$\vec{V}^{(k)}=\vec{\bar{V}}'+\sum_{k=2}^{kk}(-1)^{k-1}\vec{\bar{V}}^{(k)},\quad \sigma_{ij}^{(k)}=\sigma_{ij}'+\sum_{k=2}^{kk}(-1)^{k-1}\bar{\sigma}_{ij}^{(k)}. \tag{12}$$

После определения векторов перемещений, переходим к вычислению векторов внутренних усилий стержня при пространственно переменном нагружений:

1. Расчетные модели внутренних усилий в текущих координатных системах:

$$\vec{P}^{(k)}=\sum_{i=1}^{3}\vec{P}_i^{(k)}, \tag{13}$$

здесь

$$\vec{P}_1^{(k)} = \frac{l^3}{3Gh_0 I_0}\left\{\left(\widetilde{A}^u - \widetilde{A}^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\widetilde{V}}^{(k)}}{d\overline{x}} + \left(\widetilde{B}^u - \widetilde{B}^{p(k)}\right)\vec{\widetilde{V}}^{(k)}\right\},$$

$$\vec{P}_2^{(k)} = \frac{l^3}{3Gh_0 I_0}\left\{\widetilde{A}^{p(k)}\frac{d\vec{\widetilde{V}}^{0(k-1)}}{d\overline{x}} + \widetilde{B}^{p(k)}\vec{\widetilde{V}}^{0(k-1)}\right\},$$

$$\vec{P}_3^{(k)} = \frac{l^3}{3Gh_0 I_0}\left\{\sum_{m=1}^{k-1}\left[\widetilde{A}^{po(k-m)}\frac{d}{d\overline{x}}\left(\vec{\widetilde{V}}^{0(k-m)} - \vec{\widetilde{V}}^{0(k-m-1)}\right) + \widetilde{B}^{po(k-m)}\left(\vec{\widetilde{V}}^{0(k-m)} - \vec{\widetilde{V}}^{0(k-m-1)}\right)\right]\right\};$$

где $\vec{P}^{(k)}$ – вектор функции двенадцатого порядка:

$\vec{P}^{(k)} = \left|\overline{Q}_1^{(k)}, \overline{M}_y^{(k)}, \overline{M}_{a_1}^{(k)}, \overline{Q}_2^{(k)}, \overline{M}_z^{(k)}, \overline{M}_{a_2}^{(k)}, \overline{N}_x^{(k)}, \overline{M}_x^{(k)}, \overline{M}_\varphi^{(k)}, \overline{Q}_{a_1}^{(k)}, \overline{Q}_{a_2}^{(k)}, \overline{M}_{\overline{\varphi}}^{(k)}\right|^T$;

$\widetilde{A}^u$, $\widetilde{A}^{p(k)}$, $\widetilde{B}^u$ и $\widetilde{B}^{p(k)}$ – квадратные матрицы двенадцатого порядка и элементы описываются следующим образом: $\widetilde{a}_{10,s} = b_{s,5}$, $\widetilde{a}_{11,s} = b_{s,6}$, $\widetilde{a}_{12,s} = b_{s,4}$, $\widetilde{b}_{ij} = b_{ij}$, $\widetilde{b}_{10,s} = d_{2,s}$, $\widetilde{b}_{11,r} = d_{r,6}$, $\widetilde{b}_{12,r} = d_{r,4}$, $i, j = 1,2,3,...,9$; $s = 7,8,9$; $r = 2,3,4,5,6$; $\vec{\widetilde{V}}$ – вектор функции двенадцатого порядка.

2. Расчетные модели внутренних усилий в фиктивных координатных систем:

$$\vec{\overline{P}} = \frac{l^3}{3Gh_0 I_0}\left\{\left(\widetilde{A}^u - \widetilde{A}^{p(k)}\right)\frac{d\vec{\widetilde{V}}^{(k)}}{d\overline{x}} + \left(\widetilde{B}^u - \widetilde{B}^{p(k)}\right)\vec{\widetilde{V}}^{(k)}\right\}. \tag{14}$$

Истинные значения усилий определяются в следующем виде :

$$\vec{P}^{(k)} = \vec{P}' + \sum_{k=2}^{kk}(-1)^{k-1}\vec{\overline{P}}^{(k)}. \tag{15}$$

При построении вышеизложенных моделей были использованы безразмерные величины следующих видов: $x = l\overline{x}$, $y = b_0\overline{y}$, $z = h_0\overline{z}$, $U = h_0\overline{U}$, $V = h_0\overline{V}$, $W = h_0\overline{W}$, $\alpha_1 = \frac{h_0}{l}\overline{\alpha}_1$, $\beta_1 = \frac{h_0}{l}\overline{\beta}_1$, $\alpha_2 = \frac{h_0}{l}\overline{\alpha}_2$, $\beta_2 = \frac{h_0}{l}\overline{\beta}_2$ и $\nu = \frac{1}{l}\overline{\nu}$.

Итак, рассмотрены вопросы линеаризации разработанных нелинейных математических моделей и компьютерной реализации.

Во второй главе диссертации под названием **«Вычислительные алгоритмы и дискретные аналогии разработанных математических моделей»** разработаны вычислительные алгоритмы решения краевой задачи на основе двух аппроксимаций метода конечных разностей: центрально-разностные схемы и модификации А.А.Самарского-И.В.Фрязинова. Сформулированы геометрические, статические и смешанные граничные условия.

Краевая задача (8)-(9) после аппроксимаций по ЦРС принимает вид:

$$\left(A_i^u - A_i^{p(k)}\right)\vec{V}_{i+1}^{(k)} - \left(B_i^u - B_i^{p(k)}\right)\vec{V}_i^{(k)} + \left(C_i^u - C_i^{p(k)}\right)\vec{V}_{i-1}^{(k)} =$$
$$= \vec{F}_i^{(k)} + \vec{F}_i^{p(k)} + \vec{F}_i^{po(k)}, \tag{16}$$
$$i = 1,2,...,n-1;$$

$$\left.\begin{aligned}
\vec{V}_0^{(k)} &= \left(T_0\left(B_0^u - B_0^{p(k)}\right) - \frac{3}{2h}K_0\left(A_0^u - A_0^{p(k)}\right)\right)^{-1}\vec{\bar{Q}}_0^{(k)} - \\
&- \frac{4}{2h}K_0\left(A_0^u - A_0^{p(k)}\right)\vec{V}_1^{(k)} + \frac{1}{2h}K_0\left(A_0^u - A_0^{p(k)}\right)\vec{V}_2^{(k)}, \\
\vec{V}_N^{(k)} &= \left(T_N\left(B_N^u - B_N^{p(k)}\right) - \frac{3}{2h}K_N\left(A_N^u - A_N^{p(k)}\right)\right)^{-1}\vec{\bar{Q}}_N^{(k)} - \\
&- \frac{4}{2h}K_N\left(A_N^u - A_N^{p(k)}\right)\vec{V}_{N-1}^{(k)} + \frac{1}{2h}K_N\left(A_N^u - A_N^{p(k)}\right)\vec{V}_{N-2}^{(k)}.
\end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

Для решения алгебраических уравнений (16) с граничными условиями (17) применяется метод прогонки с применением следующей рекуррентной формулы:

$$\vec{V}_i^{(k)} = \alpha_i^{(k)}\vec{V}_{i+1}^{(k)} + \beta_i^{(k)}, \quad i = N-1,...1; \qquad (18)$$

здесь

$$\alpha_i^{(k)} = \left(\bar{B}_i^{(k)} - \bar{C}_i^{(k)}\alpha_{i-1}^{(k)}\right)^{-1} \cdot \bar{A}_i^{(k)};\ \beta_i^{(k)} = \left(\bar{B}_i^{(k)} - \bar{C}_i^{(k)}\alpha_{i-1}^{(k)}\right)^{-1}\left(\bar{C}_i^{(k)}\beta_{i-1}^{(k)} - \vec{\bar{F}}_i^{(k)}\right);$$

$$i = 1,2,3,...,N-1.$$

В МСФ векторное уравнение (8) аппроксимируется в разностной схеме с порядком $O\left(h^2\right)$ в виде разделенной на две группы (рис. 2).

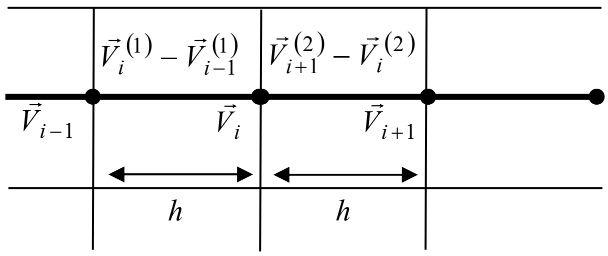


Рис. 2. Схема аппроксимации по МСФ

$$\begin{aligned}
&\frac{\left(A_{i+1/2}^u - A_{i+1/2}^{p(k)}\right)}{h}\vec{V}_{i+1}^{(k)(1)} - \left(\frac{\left(A_{i+1/2}^u - A_{i+1/2}^{p(k)}\right)}{h} + \frac{\left(A_{i-1/2}^u - A_{i-1/2}^{p(k)}\right)}{h} - h\left(D_i^u - D_i^{p(k)}\right)\right)\times \\
&\times \vec{V}_i^{(k)(1)} + \frac{\left(A_{i-1/2}^u - A_{i-1/2}^{p(k)}\right)}{h}\vec{V}_{i-1}^{(k)(1)} + \left(\left(B_{i+1}^u - B_{i+1}^{p(k)}\right) + \left(C_i^u - C_i^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_{i+1}^{(k)(2)} - \\
&- \left(\left(B_i^u - B_i^{p(k)}\right) + \left(C_i^u - C_i^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_i^{(k)(2)} = h\left(\vec{F}_i^{(k)(1)} + \vec{F}_i^{p(k)(1)} + \vec{F}_i^{po(k-m)(1)}\right); \\
&\frac{\left(A_{i+1/2}^u - A_{i+1/2}^{p(k)}\right)}{h}\vec{V}_{i+1}^{(k)(2)} - \left(\frac{\left(A_{i+1/2}^u - A_{i+1/2}^{p(k)}\right)}{h} + \frac{\left(A_{i-1/2}^u - A_{i-1/2}^{p(k)}\right)}{h} - h\left(D_i^u - D_i^{p(k)}\right)\right)\times \\
&\times \vec{V}_i^{(k)(2)} + \frac{\left(A_{i-1/2}^u - A_{i-1/2}^{p(k)}\right)}{h}\vec{V}_{i-1}^{(k)(2)} + \left(-\left(B_i^u - B_i^{p(k)}\right) - \left(C_i^u - C_i^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_i^{(k)(1)} + \\
&+ \left(-\left(B_{i-1}^u - B_{i-1}^{p(k)}\right) - \left(C_i^u - C_i^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_{i-1}^{(k)(1)} = h\left(\vec{F}_i^{(k)(2)} + \vec{F}_i^{p(k)(2)} + \vec{F}_i^{po(k-m)(2)}\right). \qquad (19)
\end{aligned}$$

Введя клеточный вектор $\vec{U}_i^{(k)} = \begin{bmatrix} \vec{V}_i^{(k)(1)} \\ \vec{V}_i^{(k)(2)} \end{bmatrix}$ в систему уравнений (19), получим следующее алгебраическое уравнение:

$$\hat{A}_i^{(k)}\vec{U}_{i+1}^{(k)}-\hat{B}_i^{(k)}\vec{U}_i^{(k)}+\hat{C}_i^{(k)}\vec{U}_{i-1}^{(k)}=\hat{F}_i^{(k)},\quad i=1,2,...,n-1; \tag{20}$$

здесь $\vec{U}_i^{(k)}$– искомый клеточный вектор-функция; $\hat{A}_i^{(k)}$, $\hat{B}_i^{(k)}$, $\hat{C}_i^{(k)}$ – клеточные матрицы и $\hat{F}_i^{(k)}$ – клеточный вектор.

Граничные условия (9) аппроксимируются по МСФ в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned}
&\left(2hT_0\left(B_0^u-B_0^{p(k)}\right)-3K_0\left(A_0^u-A_0^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_0^{(k)^{(\alpha)}}+4K_0\left(A_0^u-A_0^{p(k)}\right)\vec{V}_1^{(k)^{(\alpha)}}-\\
&-K_0\left(A_0^u-A_0^{p(k)}\right)\vec{V}_2^{(k)^{(\alpha)}}=2h\left(\vec{Q}_0^{(k)^{(\alpha)}}+\vec{Q}_0^{p(k)^{(\alpha)}}+\vec{Q}_0^{po(k-m)^{(\alpha)}}\right),\\
&\left(2hT_N\left(B_N^u-B_N^{p(k)}\right)-3K_N\left(A_N^u-A_N^{p(k)}\right)\right)\vec{V}_N^{(k)^{(\alpha)}}+4K_N\left(A_N^u-A_N^{p(k)}\right)\vec{V}_{N-1}^{(k)^{(\alpha)}}-\\
&-K_N\left(A_N^u-A_N^{p(k)}\right)\vec{V}_{N-2}^{(k)^{(\alpha)}}=2h\left(\vec{Q}_N^{(k)^{(\alpha)}}+\vec{Q}_N^{p(k)^{(\alpha)}}+\vec{Q}_N^{po(k-m)^{(\alpha)}}\right);
\end{aligned}\right\} \tag{21}$$

где $\alpha=1,2$.

Введя клеточный вектор $\vec{U}_i^{(k)}\left(i=0,1,2,N,N-1,N-2\right)$ граничное условие (21), получим следующие алгебраические уравнения:

$$\text{при}\quad i=0\qquad \hat{L}_0^{(k)}\vec{U}_0^{(k)}+\hat{L}_1^{(k)}\vec{U}_1^{(k)}+\hat{L}_2^{(k)}\vec{U}_2^{(k)}=\hat{Q}_i^{(k)}, \tag{22}$$

$$\text{при}\quad i=N\qquad \hat{L}_3^{(k)}\vec{U}_N^{(k)}+\hat{L}_4^{(k)}\vec{U}_{N-1}^{(k)}+\hat{L}_5^{(k)}\vec{U}_{N-2}^{(k)}=\hat{Q}_i^{(k)}; \tag{23}$$

где $\hat{L}_\beta^{(k)}$ $\left(\beta=\overline{0,1,...,5}\right)$ – клеточные матрицы, а $\hat{Q}_i^{(k)}$ – клеточный вектор.

Решение разработанных задач Коши (20), (22), (23) будем искать в виде:

$$\vec{U}_i^{(k)}=\hat{\alpha}_i^{(k)}\vec{U}_{i+1}^{(k)}+\vec{\beta}_i^{(k)},\quad i=N-1,....,1; \tag{24}$$

где $\hat{\alpha}_i^{(k)}=\left(\hat{B}_i^{(k)}-\hat{C}_i^{(k)}\hat{\alpha}_{i-1}^{(k)}\right)^{-1}\cdot\hat{A}_i^{(k)}$, $\quad\vec{\beta}_i^{(k)}=\left(\hat{B}_i^{(k)}-\hat{C}_i^{(k)}\hat{\alpha}_{i-1}^{(k)}\right)^{-1}\left(\hat{C}_i^{(k)}\vec{\beta}_{i-1}^{(k)}-\vec{F}_i^{(k)}\right)$, $i=1,2,3,...,N-1$.

При каждом нагружении определяется клеточный вектор перемещений $\vec{U}_i^{(k)}$ и в последнем этапе вычислительного алгоритма определяются истинные значения вектора перемещений следующим образом:

$$\vec{V}_i^{(k,\gamma)}=\left(\vec{V}_i^{(k)^{(1)}}+\vec{V}_i^{(k)^{(2)}}\right)\Big/2. \tag{25}$$

После определения вектора перемещений, вычисляется вектор внутренних усилий стержня $\vec{P}_i^{(k)}$. При этом должны обеспечиваться следующие условия:

$$\max_i\left|\vec{V}_i^{(k,\bar{\gamma}+1)}-\vec{V}_i^{(k,\bar{\gamma})}\right|<\varepsilon_1\max_i\left|\vec{V}_i^{(k,\bar{\gamma}+1)}\right| \tag{26}$$

где $\bar{\gamma}$ – число итераций; ε_1 – точность вычисления.

На основе разработанных вычислительных алгоритмов решаются тестовые задачи и оцениваются полученные численные результаты на основе критерий достоверности, точности и устойчивости.

Задача 1. Оценка разработанных вычислительных алгоритмов метода конечных разностей на основе ЦРС и МСФ с помощью метода пробных функций.

В качестве пробных функций рассмотрена система дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами при существующих граничных условиях. Задача решена алгоритмами на основе ЦРС и МСФ, а полученные численные результаты приводятся в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительная оценка результатов аппроксимации ЦРС и МСФ

Точные решения $\max\left(\vec{V}_i(x)\right)$	Аппрок-симации	Приближенные решения при различных значениях числа узлов				
		N=10	N=20	N=40	N=80	N=160
$\vec{V}_3(0.5)$=0,1875	ЦРС	0,196084	0,189646	0,188036	0,1876341	0,1875335
	МСФ	0,195260	0,189447	0,187987	0,1876218	0,1875304
Погрешность (%)	ЦРС	4,57	1,14	0,286	0,072	0,018
	МСФ	4,13	1,03	0,260	0,065	0,016

Задача 2. Проверка адекватности математической модели.

В этом примере рассмотрены вопросы адекватности математической модели, описываемой дифференциальными уравнениями четвертого порядка, разработанной на основе вариационного принципа Лагранжа. С граничными условиями $W\Big|_{\substack{x=0\\x=L}}=0$, $\dfrac{dW}{dx}\Big|_{\substack{x=0\\x=L}}=0$ построено точное решение уравнений.

Краевая задача решается с различными значениями шагов сетки h ($h=1/N$, N – число узлов). Механические и геометрические параметры стержня получены в следующем виде: l=2 *м;* h_0=0,1 *м;* b_0=0,05 *м;* f_3^+=5 *МПа;* E=$2\cdot10^5$ *МПа.*

Таблица 2

Точные и приближенные решения прогиба стержня w

	x	Точное решение	Приближенные решения				
			N=10	N=20	N=40	N=80	N=160
w	0.0	0	0	0	0	0	0
	0.2	0,0512	0,0576	0,0528	0,051600	0,051300	0,051224
	0.5	0,1250	0,1354	0,1275	0,125625	0,125156	0,125039

Задача 3. Задача изгиба стержня в вертикальной плоскости XOZ .

В этом примере рассмотрены численные результаты задачи изгиба стержня в вертикальной плоскости XOZ , защемленного обоими концами с учетом угла поворота α_1 , на основе алгоритмов ЦРС и МСФ.

Сравнительный анализ показывает, что приближенные решения рассматриваемой краевой задачи сходится до одного знака точности при N=80 по аппроксимации ЦРС. В МСФ сходится до двух знаков точности при N=20, а при N=80 результаты расчета совпадают до трех и более знаков.

Таблица 3

Приближенные решения при различных значениях числа узлов

$\max(w(x))$	Аппроксимации	N=20	N=40	N=80	N=160
$w(0.5)$	ЦРС	-0,082507	-0,149841	-0,189140	-0,202477
	МСФ	-0,205351	-0,206855	-0,207231	-0,207325
$\alpha_1(0.2)$	ЦРС	-0,243920	-0,449456	-0,569412	-0,610122
	МСФ	-0,625017	-0,625017	-0,625017	-0,625017

Отсюда можно заключить, что вычислительные алгоритмы, основанные на МСФ, более точные, чем ЦРС, и обеспечивают быстрое приближение к устойчивому решению.

Исходя из проводимых численных экспериментов и полученных результатов, можно заключить, что во время решения сложных нелинейных задач, в том числе, при решении системы нелинейных дифференциальных уравнений, использование вычислительных алгоритмов, основанных на МСФ, показывает свое преимущество.

В конце главы приведены численные реализации решения физически нелинейных задач стержней на компьютере и описание структуры созданного программного комплекса.

В третьей главе диссертации под названием **«Численное решение физически нелинейных задач стержней при пространственно повторно переменном нагружении»** исследованы численные сходимости метода конечных разностей при различных значениях шага сетки h, а также решены физически нелинейные задачи стержней на основе различных моделей переменной пластичности.

Задача 4. Решение краевой задачи призматического стержня, защемленного обоими концами, при пространственном нагружении методом конечных разностей и исследование численной сходимости.

Геометрические и механические характеристики стержня: l=2 *м;* h_0=0,1 *м;* b_0=0,1 *м;* E=2·10^5 *МПа.* Внешние нагрузки: при $z = h_0/2$, $y = b_0/2$: $f_1^+ = 0.1$, $f_2^+ = -0.05$, $f_3^+ = 0.04$ *МПа*; при $z = -h_0/2$, $y = -b_0/2$: $f_1^- = 0.08$, $f_2^- = -0.04$, $f_3^- = 0.02$ *МПа.*

Таблица 4

Перемещения при различных значениях шага сетки h

$\max(\vec{V}_i)$	N=10	N=20	N=40	N=80	N=160
$10^2 \cdot W(0{,}5)$	-0,29870	-0,30768	-0,30996	-0,31054	-0,31069
$10^2 \cdot V(0{,}5)$	0,44806	0,46151	0,46494	0,46582	0,46604
$10^2 \cdot U(0{,}5)$	-0,09000	-0,09000	-0,09000	-0,09000	-0,09000

Из табл. 4 видно, что при $N = 40$ значения перемещения W и V совпадают до двух знаков, а значения U полностью совпадают во всех точках при любых значениях N.

Сравнительный анализ показывает, что в дальнейших исследованиях количество узлов сетки N необходимо получить не менее 40.

Задача 5. Классификация физически нелинейных задач стержней при воздействии переменных нагрузок в различных плоскостях и анализ результатов расчета.

Для проведения многовариантных вычислительных экспериментов классифицированы 20 физически нелинейных задач стержней при воздействии переменных нагрузок в различных плоскостях. Процессы формирования математических моделей и их решения автоматизированы. При этом, с выбором компонентов вектора в диалоговом окне программного обеспечения, пользователь может получить решения физически нелинейных задач стержней в произвольных плоскостях.

В качестве примера рассматриваются несколько видов задачи стержня с геометрическими граничными условиями $\vec{V}^{(k)}\Big|_{\substack{x=0\\x=l}} = 0$ при $k = 1$ и $N = 40$.

Геометрические и механические параметры стержня: l=2.5 *м;* h_0=0.1 *м;* b_0=0.1 *м;* E=$2\cdot10^5$ *МПа*. Значения внешних нагрузок: $f_0^+ = 1$, $f_0^- = 2.5$, $\bar{f}_0^+ = 0.5$, $\bar{f}_0^- = 0.2$ *МПа*.

В табл. 5 приведены максимальные значения компонентов вектора перемещений $\vec{V}_i^{(k)}$ по длине стержня. В рассматриваемых задачах количество итераций γ лежит в интервале $3 \le \gamma \le 5$.

Таблица 5

Приближенные решения системы нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка

$\max\left(\vec{V}_i^{(k)}\right)$	Число уравнений (m)				
	m=2, γ=3	m=3, γ=3	m=5, γ=4	m=6, γ=5	m=9, γ=5
W (0,5)	-0,1227786	-0,1231643	-0,1231865	-0,1231860	-0,1232194
α_1 (0,2)	-0,3848242	-0,3848240	-0,3848928	-0,3848915	-0,3849963
β_1 (0,1)		-0,0092280	-0,0092290	-0,0092295	-0,0092319
V (0,5)			-0,1151421	-0,1155015	-0,1155325
α_2 (0,2)			-0,3608797	-0,3608728	-0,3609687
β_2 (0,1)				-0,0086553	-0,0086576
U (0,5)					-0,0008023
θ (0,5)					0,0021804
ν (0,5)					0,0001786

Из расчета видно, что напряженное состояние стержня зависит от того, в какой плоскости он рассматривается и от учета совместного действия продольных, поперечных и крутильных сил.

Задача 6. Численное решение и анализ физически нелинейных задач стержней на основе различных моделей переменной пластичности.

Здесь рассмотрены численные результаты и анализ физически нелинейных задач призматического стержня, защемленного обоими концами, при $k = 2$ и $k = 10$ на основе различных моделей переменной пластичности

При этом, в качестве исследуемого объекта получен стержень, изготовленный из алюминиевого сплава $B-96$.

Таблица 6

Значения $\vec{V}_i^{(k)}$ полученного на основе различных моделей

$\max\left(\vec{V}_i^{(k)}\right)$	$k=2$			$k=10$		
	Различные модели переменной пластичности					
	Мазинг-Москвитин (γ=4)	Гусенков-Шнейдерович (γ=4)	Т.Буриев (γ=5)	Мазинг-Москвитин (γ=3)	Гусенков-Шнейдерович (γ=3)	Т.Буриев (γ=4)
$W^{(k)}(0.5)$	0,274187	0,274189	0,274398	0,274144	0,274132	0,274375
$\alpha_1^{(k)}(0.3)$	0,722022	0,722027	0,722560	0,721904	0,721872	0,722499
$\beta_1^{(k)}(0.1)$	0,019853	0,019854	0,019871	0,019851	0,019851	0,019869
$V^{(k)}(0.5)$	0,257083	0,257084	0,257279	0,257043	0,257030	0,257261
$\alpha_2^{(k)}(0.3)$	0,676963	0,676968	0,677462	0,676851	0,676819	0,677415
$\beta_2^{(k)}(0.1)$	0,018617	0,018618	0,018634	0,018615	0,018615	0,018632
$U^{(k)}(0.5)$	0,001720	0,001720	0,001721	0,001719	0,001719	0,001721
$\theta^{(k)}(0.5)$	-0,003633	-0,003633	-0,003633	-0,003633	-0,003633	-0,003633
$\nu^{(k)}(0.1)$	-0,000300	-0,000300	-0,000305	-0,000298	-0,000297	-0,000304

Задача 7. Решение нелинейных краевых задач стержней с учетом упругой разгрузки и вторичных пластических деформаций.

Определение упругой разгрузки и вторичных пластических деформаций позволяет качественно описать отдельные явления напряженного состояния стержня при переменном нагружении. Полученные безразмерные результаты приведены в виде графиков (рис. 3).

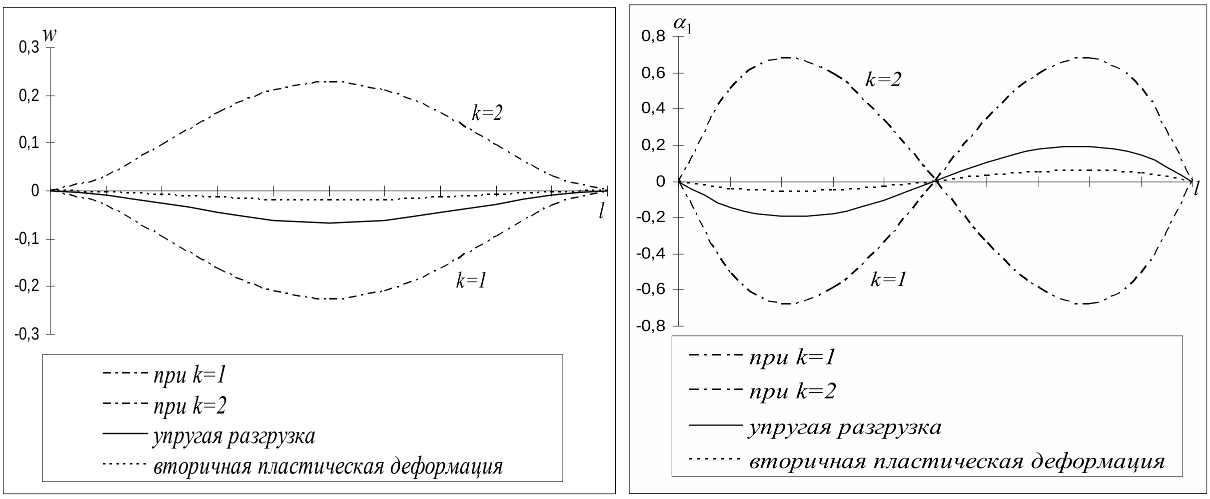


Рис. 3. Значения компонентов вектора перемещений при k **=** *1* **и** *2*

Задача 8. Исследование напряженное состояние стержней при пространственно переменном нагружении с различными граничными условиями с учетом накопления повреждений.

Рассматриваемая задача решается с геометрическими, смешанными и статическими граничными условиями. В табл. 7 приведены значения функции пластичности $\omega^{(k)}(\eta)$, функции повреждаемости $\eta^{(k)}$, интенсивности деформаций $\bar{\varepsilon}_u^{(k)}(\eta)$ и интенсивности напряжений $\bar{\sigma}_u^{(k)}(\eta)$ стержня при k=1 и 20.

Результаты расчета соответствует координатам $y=0; z=h_0$ поперечного сечения стержня.

Таблица 7

Напряженное состояние стержня при пространственном повторно-переменном нагружении

k	x	$\omega^{(k)}(\eta)$	$\eta^{(k)}$	$\bar{\varepsilon}_u^{(k)}(\eta)$	$10^{-3}\bar{\sigma}_u^{(k)}(\eta)$
k=1	0.0	0,719873	0,000000	0,006192	3,659220
	0.6	0,379451	0,000000	0,002497	3,289760
	1.0	0,089999	0,000000	0,001656	3,205700
k=20	0.0	0,688097	0,027085	0,006196	4,081510
	0.6	0,301031	0,024363	0,002500	3,711940
	1.0	0,000000	0,022425	0,001659	3,627850

На рис. 4 показаны зоны пластичности по поперечным сечениям x=0.0; 0.2; 0.4; 0.6; 0.8 и 1.0. А на рис. 5 показаны изменения зоны пластичности по циклам нагружения при k=2,4,6, …, 20.

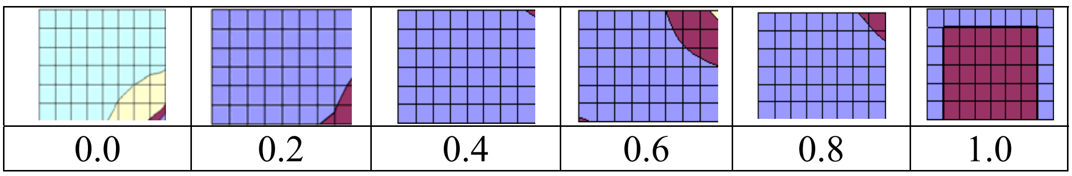


Рис. 4. Зоны пластичности по поперечным сечениям при k=1

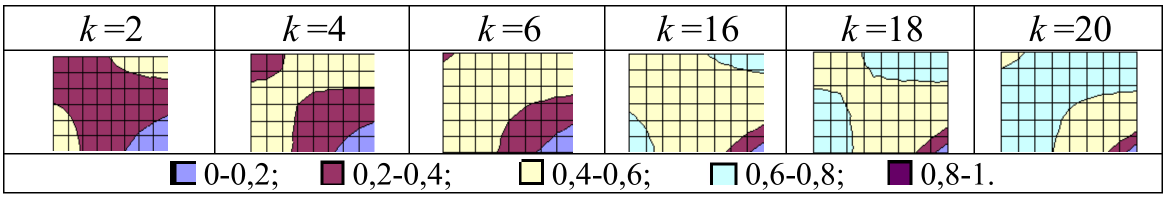


Рис. 5. Изменение зоны пластичности в (x=0) поперечного сечения стержня при циклических нагружениях

На рис. 6 приведены зоны поврежденности по поперечным сечениям $x=0.0$; 0.2; 0.4; 0.6; 0.8 и 1.0 при k=2 и γ=4. На рис. 7 показаны изменения зоны поврежденности в поперечном сечении $x=0.0$ по циклам нагружения при k=4,6,8, …, 20.

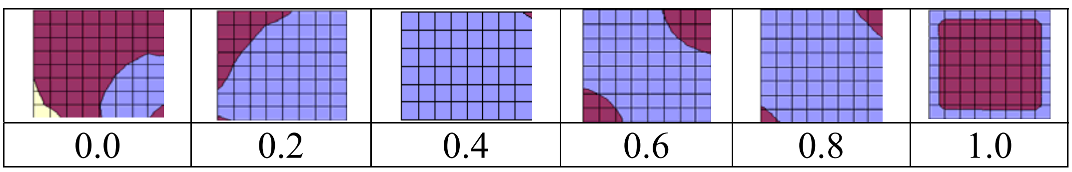


Рис. 6. Зоны поврежденности по поперечным сечениям при k=2

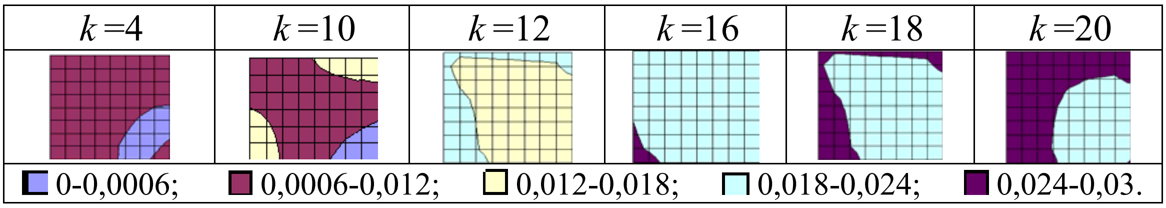


Рис. 7. Изменение зоны поврежденности в (x=0) поперечного сечения стержня при циклических нагружениях

Результаты численного эксперимента показывают, что с увеличением числа циклов нагружения увеличиваются значения функции пластичности и повреждаемости, а это, в свою очередь, влияет на кинетику напряженно-деформированного состояния стержня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследований, проведенных по теме диссертации «Математические модели и алгоритмы решения физически нелинейных задач стержней при пространственно переменном нагружении», представлены следующие выводы:

1. На основе вариационного принципа Лагранжа и уточненной теории В.К.Кабулова разработаны математические модели физически нелинейных задач стержней с учетом повреждаемости материалов. Эти модели служат для подробного описания процессов нелинейного деформирования стержней с учетом совместного действия продольных, поперечных и крутильных сил.

2. Разработаны многопараметрические математические модели, описываемые системами нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с естественными граничными условиями, для исследования напряженного состояния стержней при пространственно переменном нагружении в текущих и фиктивных координатных системах. Эти модели обеспечивают возможность исследования напряженного состояния стержней при циклическом нагружении на основе различных подходов.

3. Разработаны вычислительные алгоритмы на основе метода конечных разностей и итерационного процесса. На основе разработанных алгоритмов решены тестовые примеры, полученные численные результаты оценены по критериям достоверности, точности и устойчивости. Также проанализированы численные результаты при различных значениях шага сетки h и проверена устойчивость вычислительных алгоритмов. Достоверность результатов обоснована путем сравнения точных и приближенных решений. Вычислительные алгоритмы обеспечивают возможность приближения к устойчивому решению по назначенной точности ε при числе узлов N=40.

4. Исследованы вычислительные алгоритмы с различными аппроксимациями. Анализ полученных численных результатов показывают, что скорость вычисления разработанных вычислительных алгоритмов метода конечных разностей по модификации А.А.Самарского-И.В.Фрязинова в 2 раза выше, а

точность на 27 % больше, чем у вычислительного алгоритма, основанного на аппроксимации центральной разностной схемы. Использование этого вычислительного алгоритма МСФ обеспечивает возможность более быстрого приближения к устойчивому решению.

5. Разработаны геометрические, статические и смешанные граничные условия в скалярном и векторном виде для физически нелинейных задач стержней. А это служит для точного и подобного исследования жизненных задач, встречающихся в практике проектирования.

6. Созданы компьютерная реализация и программное обеспечение разработанных эффективных вычислительных алгоритмов. Сформулированы двадцать физически нелинейных задач конструкционных материалов типа стержня, используемых в практике проектно-изыскательных работ, и проведены численные эксперименты. При этом, решены системы n нелинейных дифференциальных уравнений, связанных с параметром n (n =2,3, ..., 9). Анализ численных результатов показывает, что решение системы девяти нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с учетом всех параметров вектора перемещений по осям OX , OY и OZ обеспечивает возможность подробно описать напряженное состояние и физико-механические свойства рассматриваемого объекта. А это в свою очередь служит фундаментальной основой при формировании и выдаче соответствующих прикладных предложений и рекомендаций инженерам-проектировщикам.

7. На основе принципа Мазинга-Москвитина решены нелинейные задачи стержней с учетом упругой разгрузки и вторичных пластических деформаций. Эти исследования обеспечивают возможность оценки остаточных деформаций, появляющихся в материалах, и разработать прикладные выводы.

8. На основе различных моделей переменной пластичности решены нелинейные задачи стержней при пространственно повторно-переменном нагружении. Исследованы математические модели, полученные в текущих и фиктивных координатных системах с различными граничными условиями. Настоящие исследования позволяют работать с численными результатами, т.е. полно описывающие появление зон пластичности, повреждаемости и законы их изменения в поперечном сечении стержня, также состояние его разрушения при циклических нагружениях.

9. Разработанные математические и программные обеспечения внедрены на объектах предприятий «Tashkent metroproekt», «Techno engineering expert» и «Zamin dizayn» при выполнении проектно-изыскательных работ. Результаты научных исследований обеспечили возможность сокращения срока вычислительного процесса в 2 раза и уменьшения погрешности вычислений на 18 %, что позволило повысить качество и скорость общих проектных процессов.

SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES DSc.27.06.2017.T.07.01 AT TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES

NAMANGAN ENGINEERING – CONSTRUCTION INSTITUTE

ISOMIDDINOV ANVARJON INOMJONOVICH

MATHEMATICAL MODELS AND ALGORITHMS FOR SOLVING PHYSICALLY NONLINEAR ROD PROBLEMS UNDER SPATIALLY VARIABLE LOADING

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes

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

Tashkent – 2018

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 № B2017.2.PhD/T194

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

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russion, 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.ziyonet.uz.

Scientific adviser:	**Yuldashev Tadjimat** doctor of technical sciences
Official opponents:	**Khujaev Ismatulla Kushayevich** doctor of technical sciences
	Rasulmukhamedov Makhamadaziz Makhamadaminovich candidate of physical and mathematical sciences, docent
Leading organization:	**Tashkent chemical-technological institute**

The defense of the dissertation will take place on «____» ___________ 2018 at _____ o'clock at the meeting of Scientific Council DSc.27.06.2017.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-resourse center of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under № _______) (Address: 100202, Tashkent, A.Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52)

Abstract of dissertation sent out on "____" ______________ 2018 year
(mailing report № ___ on "____" ______________ 2018 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

N. Ravshanov
Chairman of the academic seminar under the
scientific council awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is to develop the mathematical models, effective computational algorithms and software for the processes of physically nonlinear strain of rods under spatially variable loading taking into account the damageability of materials.

The object of the research work is the process of studying the stress-strain state of rods under spatially repeated variable loading, taking into account the plasticity and damageability function.

Scientific novelty of the research work is a follows:

on the basis of the refined theory of V.K.Kabulov and the variation principle, mathematical models are developed for solving physically nonlinear rod problems under the influence of complex external forces, taking into account the damageability of materials;

the multi-parameter mathematical models in the form of a system of nine nonlinear differential equations of the second order are developed with natural boundary conditions for studying the stress state of rods in the case of spatially repeated loading in current and dummy coordinate systems;

by the A.A.Ilyushin method of elastic solution the computational algorithms for solving physically nonlinear problems of rods with different approximations are developed based on the central difference scheme and the modification of A.A.Samarsky-I.V.Fryazinov (MSF) method of finite differences;

the effective computational algorithms providing fast approximation to a stable solution, a high degree of accuracy, directed to the numerical calculation of some physically nonlinear rod problems, described by mathematical models of multi-parameter differential equations are developed;

an automated system has been created on the computer that allows the formation and solution of physically nonlinear rod problems for various variable loads and the planes with geometric, static and mixed boundary conditions.

Implementation of the research results. On the basis, of created mathematical models, algorithms and software complexes for solving physically nonlinear problems of rods with account of the function of plasticity and damageability, as well as evaluating the stress state of materials the following aspects implemented:

mathematical models in the form of a system of second-order nonlinear differential equations developed on the basis of the variation principle, computational algorithms and program complexes are implemented at the facilities of the enterprises: LLC "Tashkent Metroproekt", LLC "Techno Engineering Expert" and LLC "Zamin Dizayn" (certificate on the implementation of the State Committee on architecture and construction №164/02-13, 09.01.2018). The results of scientific research, so the reduction of the computing time by 2 times and the reduction of the calculation error by 18 % made it possible to improve the quality and speed of the overall design processes;

developed mathematical models for physically non-linear rod problems with spatially repeated variable loading in current and dummy coordinate systems, computational algorithms and program complexes are introduced in the process of designing Metro facilities in Tashkent by LLC Tashkent Metroproekt (certificate on the implementation of the State Committee for Architecture and Construction No. 164/02-13, 09.01.2018). The results of scientific research, i.e. developed software made it possible to increase the efficiency of design works of underground facilities by 12-18 %;

developed computational algorithms based on modification of A.A. Samarsky – I.V. Fryazinov method of finite differences for a system of nonlinear differential equations with natural boundary conditions are introduced into the design of engineering works by LLC "Techno Engineering Expert" (certificate on the implementation of the State Committee on Architecture and Construction No. 164 / 02-13, 09.01.2018). The results of the research in the form of computational algorithms made it possible to improve remarkably the initial design work of structural elements, including 1,2 times increase in the accuracy of calculations, and 15-20 % increase in the quality and speed of design processes.

automated system that provides the calculation of physically nonlinear rods problems and analysis of numerical results, taking into account the joint action of longitudinal, transverse and torsional forces, is introduced into the process of design and calculation by LLC Zamin Dizayn (certificate on the implementation of the State Committee for Architecture and Construction No. 164/02-13, 09.01.2018). The results of the research in the form of created automated system made it possible to reduce the calculation error down to 18 % and to increase the design efficiency to 25 %.

Structure and volume of the dissertation. The structure of the dissertation consists 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

1. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Исомиддинов А.И., Маткаримов А.Х. Моделирование процессов деформирования и повреждаемости тонкостенных конструкций. – Ташкент: Узбекистан, Монография, 2012. – 153 с.

2. Абдусаттаров А., Олимов М., Исомиддинов А.И. Упругопластические состояния стержней при пространственном нагружении с учетом упрочнения-разупрочнения и повреждаемости // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2007. – № 2. – С. 36-42, (05.00.00; №11).

3. Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И., Рузиева Н.Б. Об алгоритмах расчета и анализа упруго-пластических стержней при пространственно переменном нагружении // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2010. – № 2. – С. 22-28, (05.00.00; №11).

4. Абдусаттаров А., Маткаримов П.Ж., Исомиддинов А.И. О реализации алгоритмов расчета тонкостенных стержней при пространственно-переменных нагружениях // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2011. – № 2. – С. 23-28, (05.00.00; №11).

5. Юлдашев Т., Исомиддинов А.И. Разработка математических моделей и вычислительных процессов решения краевых задач элементов конструкций типа стерженя // Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2011. – № 4. – С. 55-59, (05.00.00; №10).

6. Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И. Численный анализ процессов накопления повреждений и кинетики НДС стержней при пространственно-переменных нагружениях. // Узб. журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2011. – № 3-4. – С. 5-9, (05.00.00; №6).

7. Абдусаттаров А.А., Исомиддинов А.И. Численный расчет стержней при повторном нагружении с учетом упругой разгрузки и вторичных пластических деформаций // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2011. – № 3. – С. 30-33, (05.00.00; №11).

8. Рашидов Т.Р., Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И. Моделирование процессов пластического деформирования и повреждаемости тонкостенных стержней при пространственно – переменном нагружении // ДАН РУз. – Ташкент, 2011. № 4. – С. 38-41, (05.00.00; №9).

9. Юлдашев Т., Исомиддинов А.И. Алгоритмы решения системы дифференциальных уравнений второго порядка и сравнительный анализ результатов // Узб. журнал «Проблемы информатики и энергетики». – Ташкент, 2011. – №2. – С. 29-34, (05.00.00; №5).

10. Исомиддинов А.И. Построение дискретных моделей и алгоритмов расчета стержней с учетом повреждаемости материалов // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2012. – № 2. – С. 31-38, (05.00.00; №11).

11. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Олимов М., Исомиддинов А.И. Исследование НДС стержня при повторно переменных нагружениях с учетом

накопления повреждения // Узб. журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2014. – № 1. – С. 10-13, (05.00.00; №6).

12. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Исомиддинов А.И. К расчету тонкостенных стержней при пространственно-переменном нагружении с учетом свойств упрочнения-разупрочнения // Узб. журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2014. – № 2. – С. 9-12, (05.00.00; №6).

13. Исомиддинов А.И. Численный анализ, сравнения и оценки результатов аппроксимации метода конечных разностей // Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2015. – № 2. – С. 117-121, (05.00.00; №10).

14. Исомиддинов А.И. Компьютерная реализация и технологии решения задач по математическим моделям, имеющие нелинейный характер для тонкостенных конструкций // Узб. журнал «Проблемы информатики и энергетики». – Ташкент, 2015. – № 6. – С. 28-33, (05.00.00; №5).

15. Юлдашев Т., Исомиддинов А.И. Численное решение физически нелинейных задач стержней при пространственно-переменном нагружении // ДАН РУз. – Ташкент, 2015. №3. – С. 32-37, (05.00.00; №9).

16. Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И. Разработка алгоритмов расчета стержней при пространственно-переменном нагружении с учетом накопления повреждений // Вестник ТашИИТ, – Ташкент, 2015. – №2, – С. 46-53, (05.00.00; №11)

17. Isomiddinov A.I. Boundary problems of elastic rods and their solution by finite difference method in various approximations // European science review. – Austria, 2016. – № 1-2. – pp. 145-148, (05.00.00; №3).

18. Абдусаттаров А., Куракбаев Д., Исомиддинов А.И. К процедуре расчета тонкостенных стержней при пространственно-переменных нагружениях с учетом обобщенного принципа Мазинга // Вестник Казахстанского национального технического университета. – Астана (Казахстан), 2014. – №6. – С. 296-301.

19. Абдусаттаров А.А., Олимов М., Исомиддинов А.И. Расчет тонкостенных стержней по уточненным теориям при пространственно-переменных упруго пластических нагружениях // Современное состояние и перспективы усовершенствования преподавания строительных дисциплин: Материалы Республиканской научно-технической конференции. 16-17 сентября 2009. – Ташкент, 2009. – С. 122-129.

20. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Олимов М., Исомиддинов А.И. К процедуре расчета упругопластических стержней при пространственном нагружении с учетом циклического упрочнения и повреждаемости // Современные проблемы механики: Материалы Международной научно-технической конференции. – Ташкент, 2009. – С. 222-225.

21. Абдусаттаров А., Олимов М., Исомиддинов А.И. О разработке алгоритмов расчета тонкостенных упругопластических стержней при пространственном нагружении // Ресурсосберегающие технологии в строительстве: Межвузовских сборник научных трудов – Ташкент, 2010. – Вып.5. – С. 23-27.

22. Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И., Абдукадыров Ф.Э. Алгоритмы расчета тонкостенных стержней при пространственно – переменных нагружениях // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела: Материалы VII Международного научного симпозиума. – Тверь, 2011. – С. 50-54.
23. Абдусаттаров А., Олимов М., Исомиддинов А.И. Исследование численной сходимости метода конечных разностей для расчета защемленного с обоих концов стержня при знакопеременном нагружении // Рақобатбардош кадрлар тайёрлашда мустақил таълим: Республика илмий-амалий конференцияси. – Наманган, 2008. – Б. 300-302.
24. Исомиддинов А.И. Об алгоритмах расчета элементов конструкций при повторно-переменных нагружениях // Педагогик жараёнларни ташкил этиш ва бошқаришда замонавий ёндашувлар: Республика илмий-амалий конференцияси. – Наманган, 2011. – Б. 365-366.
25. Исомиддинов А.И. Исследование напряженно деформированного состояния стержня при повторно переменных нагружениях с учетом накопления повреждения // Проблемы внедрения инновационных идей, технологий и проектов в производства: Материалы Республиканской научно-технической конференции. 6-7-май 2011. – Жиззах, 2011. – С. 135-138.
26. Юлдашев Т., Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И. Алгоритмы решения задач типа стержня при пространственном повторно – переменном нагружении // Проблемы современной математики: Труды Республиканской научно-технической конференции. – Карши, 2011. – С. 579-582.
27. Исомиддинов А.И. Моделирование и алгоритмизация решения задачи стержней при циклическом пространственном нагружении с учетом повреждаемости материалов // Современное состояние и перспективы развития информационных технологий: Материалы Республиканской научно-технической конференции. 5-6 сентября 2011. – Ташкент, 2011. – С. 102-106.
28. Исомиддинов А.И. Исследование интенсивности деформаций и функции пластичности при расчете стержней в различных постановках // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Материалы Республиканской научно-технической конференции. 15-16 декабря 2011. – Ташкент, 2011. – С. 211-213.
29. Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И. и др. Алгоритмы расчета тонкостенных стержней при пространственно – переменных нагружениях // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела: Тезисы докладов VII Международный научный симпозиум. – Тверь, 2010. – С. 7.
30. Юлдашев Т., Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И. Разработка алгоритмов расчета тонкостенных конструкций при переменных нагружениях и разгружениях // Современные проблемы механики грунтов и сложных реологических систем: Материалы международной научно-технической конференции. 19-20 апреля 2013.– Самарканд, 2013. – С. 315-319.

31. Юлдашев Т., Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И. Компьютерное моделирование решения нелинейных задач элементов конструкций // «Информатика: проблемы, методология, технологии»: Материалы XIV международной научно-методической конференции. 6-8 февраля 2014. – Воронеж, 2014. – С. 29-31.

32. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Исомиддинов А.И. К расчету тонкостенных стержней при пространственно-переменном нагружении с учетом повреждаемости // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела: Материалы VIII международного симпозиума. 9-11 декабря 2015. – Тверь, 2015. – С. 75-78.

33. Исомиддинов А.И. К созданию математического обеспечения по расчету физически нелинейных задач стержней при пространственном повторно-переменном нагружении // «Информатика: проблемы, методология, технологии»: Материалы XV международной научно-методической конференции. 12-13 февраля 2015. – Воронеж, 2015. – С. 80-83.

34. Исомиддинов А.И. Автоматизированная система для решения классифицированных физически нелинейных задач элементов конструкций // «Наука, образование, инновации: пути развития»: Материалы шестой всероссийской научно-практической конференции. 21-24 апреля 2015. – Петропавловск-Камчатский, 2015. – С. 17-21.

35. Исомиддинов А.И. Исследование различных математических моделей переменной пластичности // «Информатика: проблемы, методология, технология»: Материалы XVI международной конференции. 11-12 февраля 2016. – Воронеж, 2016. – С. 219-223.

36. Олимов М., Исомиддинов А.И. Расчет функции пластичности пространственных упруго-пластических стержней // Кадрлар тайёрлаш сифатини оширишда замонавий педагогик технологияларнинг роли: Республика илмий-амалий конференцияси. – Наманган, 2009. – Б. 28-30.

37. Исомиддинов А.И., Юлдашев Т и др. Программное обеспечение для расчета стержней при пространственных нагружениях с учетом пластичности и повреждаемости // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство № DGU 02194. 19.05.2011 г.

38. Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И. Упругопластических расчет стержней при пространственно-переменном нагружении с учетом повреждаемости // Упругость и неупругость: Материалы международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел. 20-21 января 2016. – Москва, 2016. – С. 272-276.

Автореферат "Ҳисоблаш ва амалий математика муаммолари" илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ҳамда ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

Бичими 60x84 1/16. "Times New Roman" гарнитура рақамли босма усулда босилди.
Шартли босма табоғи. 3,5 т. Адади 100. Буюртма № 11.

«ЎзР Фанлар Академияси Асосий кутубхонаси» босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: 100170, Тошкент ш., Зиёлилар кўчаси, 13-уй.