

**ЎЗР ФА МЕХАНИКА ВА ИНШОТЛАР СЕЙСМИК
МУСТАҲКАМЛИГИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ АСОСИДАГИ БИР МАРТАЛИК ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ

САБИРОВ НИЗАМБАЙ ХАЙИТБАЕВИЧ

**ҚОБИҚЛИ КОНСТРУКЦИЯЛАРНИНГ ТУРЛИ ЮКЛАНИШ
КЎРИНИШЛАРИДА ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШИНИ ҲИСОБЛАШНИ
СОҢЛИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Соғли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

Тошкент – 2020

**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**

Сабилов Низамбай Хайитбаевич

Қобикли конструкцияларнинг турли юкланиш кўринишларида
деформацияланишини ҳисоблашни сонли моделлаштириш..... 3

Сабилов Низамбай Хайитбаевич

Численное моделирование расчета деформирования оболочечных
конструкций при различных видах нагружений..... 23

Sabirov Nizambay Hayitbayevich

Numerical simulation of the calculation of the deformation of envelope structures
at different types of loading..... 43

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ

Список опубликованных работ
List of published works..... 47

**ЎЗР ФА МЕХАНИКА ВА ИНШОТЛАР СЕЙСМИК
МУСТАҲКАМЛИГИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.Т/ФМ.61.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ АСОСИДАГИ БИР МАРТАЛИК ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ

САБИРОВ НИЗАМБАЙ ХАЙИТБАЕВИЧ

**ҚОБИҚЛИ КОНСТРУКЦИЯЛАРНИНГ ТУРЛИ ЮКЛАНИШ
КЎРИНИШЛАРИДА ДЕФОРМАЦИЯЛАНИШИНИ ҲИСОБЛАШНИ
СОҢЛИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Соғли усуллар ва дастурлар мажмуи

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

Тошкент – 2020

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.3.PhD/T556 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат транспорт университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбарлар:

Абдусаттаров Абдусамат
техника фанлари доктори, профессор

Юлдашев Таджимат
техника фанлари доктори, к.и.х

Расмий оппонентлар:

Юлдашев Шарафитдин Сайфитдинович.
техника фанлари доктори, профессор

Нуралиев Фахриддин Муродуллаевич
техника фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот:

Ўзбекистон миллий университети

Диссертация химояси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти ҳузуридаги фан доктори илмий даражасини берувчи DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 рақамли Илмий кенгаш асосидаги тузилган бир марталик илмий кенгашнинг 2020 йил « 16 » декабрь, 14⁰⁰ соат « ____ » даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33, 1- мажлислар зали. Тел.: (99871) 262-71-52; факс: (99871) 262-71-32, e-mail: instmech@academy.uz).

Диссертация билан Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Асосий кутубхонаси Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (– рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Зиёлилар кўчаси, 13 уй.

Диссертация автореферати 2020 йил « 03 » декабрь куни тарқатилди.
(2020 йил « ____ » декабрдаги 1 рақамли реестр баённомаси).



[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

М.М. Мирсаидов

Илмий даражалар берувчи бир марталик илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор, ЎзР ФА академиги

М.К. Усаров

Илмий даражалар берувчи бир марталик илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., к.и.х.

Р.А. Абиров

Илмий даражалар берувчи бир марталик илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., к.и.х.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда иншоот ва конструкцияларнинг турли элементларини лойиҳалашда ишлатиладиган эластик қобик конструкцияларнинг деформацияланишини ҳисоблаш усуллари ишлаб чиқишга ва такомиллаштиришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Шунинг учун ҳам, юпқа қобик конструкцияларининг ишчи параметрларини кучайтириш, мустаҳкамлигини ошириш, материал сарфини камайтириш, уларни транспорт қурилиши, машинасозлик, энергетика тармоқларида кенгроқ қўллашни кўпайтириш энг муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Юпқа қобик конструкциялар (қурилишда қопламалар, иссиқлик энергияси қурилмалари, газ ва нефть қувурлари, юқори босимли идишлар, вагон кузовлари, цистерна қозонлари, туннеллар қобиғи ёпмаси) ўзига хос конструктив шаклларга, ишлаб чиқариш технологияси, иш шароитлари, қўлланиладиган материалларнинг физик-механик хоссалари билан фарқланади.

Жаҳонда конструкциялар деформацияланишининг математик моделлари, ҳисоблашнинг сонли услублари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш, юпқа қобик конструкцияларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини таҳлил қилиш бўйича илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу йўналишда эксплуатация тавсифлари яхшиланган қобик конструкциялар моделлари, уларни ҳисоблаш услубларини ишлаб чиқиш, ҳамда эластиклик чегарасида ва ундан ташқарида турли юклантиришларда конструкциялар элементларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатлари мавжуд моделларини такомиллаштириш ва тадқиқ этиш муҳим масалалардан бўлиб ҳисобланади.

Республикамизда юпқа конструкциялар ва замонавий иншоотларни лойиҳалаштириш бўйича кенг кўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. Шунга боғлиқ ҳолда, қобик конструкциялар элементларининг эксплуатация тавсифлари яхшиланган цилиндрик ва сферик қобиклардан иборат бўлган янги типларини ишлаб чиқиш, шунингдек мавжуд моделларини такомиллаштириш, замонавий сонли услублар, ҳамда шахсий компьютерлардан фойдаланган ҳолда конструкцияларнинг юк кўтариш имкониятларини баҳолаш мақсадида лойиҳа олди ҳисоблаш бажарилишини тақозо қилади. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида «...йўл-транспорт, муҳандислик–коммуникация ва ижтимоий инфратузилмаларни лойиҳалаш ҳамда модернизация қилиш, ...информацион–коммуникацион технологияларни жорий этиш ...»¹ вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни бажаришда аниқлаштирилган математик моделларини ишлаб чиқиш, турли юкланиш турларида қобик конструкцияларнинг ҳисобини бажариш мақсадида дастурий воситаларни яратиш, геометрик параметрларини ва механик характеристикаларини кучланганлик – деформацияланганлик ҳолатига кўрсатадиган таъсирини таҳлил қилиш масаласи қўйилган.

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 «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш Ҳаракатлари стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 9 августдаги ПҚ-3190-сонли «Ўзбекистон Республикаси ҳудуди ва аҳолисининг сейсмик хавфсизлиги, сейсмик чидамли қурилиш ва сейсмология соҳасида илмий тадқиқотлар ўтказишни янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2018 йил 27 апрелдаги №ПҚ-3682 «Инновацион ғоялар, технологиялар, лойиҳаларни амалий татбиқ этиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорларида ва ушбу соҳа бўйича қабул қилинган бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда кўзда тутилган вазифаларнинг бажарилишига ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг IV. «Математика, механика ва информатика» устувор йўналишларига мос равишда бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Деформацияланиш жараёнларини моделлаштириш ва эластик қобик конструкцияларнинг турлича юкланиш кўринишларида ҳисоблаш усуллари бўйича илмий тадқиқотлар Н.Reissner, E.Meissner, W.Flugge, L.H.Donnell, A.E.Green, W.Zerna, W.T.Koiter, P.M.Nagdi, C.Truesdell, H.Neuber, N.Hoff, A.Libai, A.Love, S.P.Timoshenko, J.C.Simmonds, S.Woinowsky–Krieger каби таниқли хорижий олимлар томонидан ўтказилган. Эластик ва эластик-пластик қобик конструкцияларини ҳисоблаш назарияси ва услублари ривожига А.А.Ильющин, С.А.Амбарцумян, Н.А.Алфутов, В.В.Болотин, Т.Буриев, В.З.Власов, А.С.Вольмир, Э.И.Григолюк, Я.М.Григоренко, А.П.Гусенков, В.В.Новожилов, А.И.Лурье, В.В.Москвитин, В.И.Мяченков, В.И.Мальцев, Х.М.Муштари, В.К.Қабулов, Э.И.Старовойтов, Х.А.Рахматулин, Т.Р.Рашидов, Т.Ш.Ширинқулов, А.П.Филин каби олимларнинг илмий ишлари катта таъсир кўрсатди.

Юпқа деворли конструкциялар ва иншоотларнинг такрорий юкланишларда эластиклик чегарасида ва ундан ташқарида юк кўтарувчи элементларни ҳисоблашда асосан А.А.Ильющин - В.В.Москвитин томонидан шакллантирилган кичик эластик-пластик деформациялар назарияси қўлланилади. Материалларнинг емирилишини ва кам такрорланишли мустаҳкамлик мезонлари учун турли хил вариантлар И.А.Биргер, В.С.Бондар, Л.Коффин, С.Мэнсон, Т.Йокобори, С.В.Серенсен, Н.А.Махутов, Г.В.Москвитин, Г.П.Черепанов, В.Т.Троценко, А.М.Локощенколар томонидан таклиф қилинган.

Мамлакатимизда эластиклик ва пластиклик назарияси масалаларини ечишни моделлаштириш ва автоматлаштириш вазифалари илк маротаба академик В.К.Қабулов томонидан илгари сурилган, ушбу йўналишдаги изланишлар унинг шогирдлари ва издошлари Т.Бўриев, К.Ш.Бабамуродов, Ф.Б.Бадалов, Б.Курманбаев, А.А.Халджигитов, Т.Юлдашев, Н.Равшанов, А.М.Пўлатов, Р.А.Абиров, Ш.А.Назиров, Ф.М.Нуралиев, Б.А.Худаяров, Ш.А.Анарова, М.М.Расулмухаммедовлар томонидан давом эттирилди. Юпқа деворли конструкцияларни ўзгарувчан юкланиш ва юксизланиш жараёнини

ҳисоблашни деформацияланиш диаграммасининг эластиклик чегараларида ва ундан ташқаридаги жорий қийматларида алгоритмлаш, ЭҲМни жорий қилишни ривожлантириш масалалари академик Т.Бўриев томонидан кўриб чиқилган. Деформацияланувчи қаттиқ жисм ва юпқа деворли конструкциянинг статик ва динамик юкланишдаги деформацияланиш муаммолари, моделла-рини ишлаб чиқиш ва сонли ҳисоблашлар, шунингдек конструкцияларнинг грунт билан ўзаро таъсири масалалари Т.Р.Рашидов, М.М.Мирсаидов, Г.Х.Хожметов, Б.Мардонов, К.С.Султанов, Х.Х.Худайназаров, Б.Х.Хужаёров, Т.М.Мавланов, К.Исмаилов, Б.Э. Хусанов, И. Сафаров, А.Б.Ахмедов, Р.А.Абдукаримов, И.Мирзаев, Р.Ш.Индиаминов, М.К.Усаров, А.Х.Маткаримов ва Х.Сагдиевлар томонидан тадқиқ этилган. Сўнгги йилларда вагон-цистерналарнинг янги авлодлари яратилмоқда. Шу муносабат билан, янги типдаги қобик конструкциялар, эксплуатация тавсифлари яхшиланган цистерна элементларини ҳисоблаш, шунингдек мавжуд моделларни такомиллаштириш, юк кўтариш имкониятини таҳлил қилиш мақсадида замонавий сонли усуллар ва шахсий компьютерлардан фойдаланиб цистернанинг лойиҳа олди ҳисоблаш ишларини амалга оширилишини шарт қилиб кўяди. Ҳаракатланувчи поезд элементларининг, хусусан, вагон-цистерналарнинг мустаҳкамлик ва ишончилигини ҳисоблаш услубларини ишлаб чиқиш масалалари билан боғлиқ тадқиқотлар устида С.В.Вершинский, И.Г.Морчиладзе, В.Н. Котуранов, В.В. Лукин, И.И. Челноков, Л.А. Шадур, Ш.С. Файзибаев, Я. Рўзметовлар иш олиб борганлар.

Соҳага оид тадқиқотларнинг замонавий ҳолатини ўрганиш ва юпқа қобик конструкцияларни (цистерна ўзаги типдаги) турли типдаги юкланишларда материалларнинг емирилишларини ва кичик цикли мустаҳкамликни ҳисобга олган ҳолдаги деформацияланиш жараёнларини моделлаштириш ва юпқа деворли стерженлар ҳисоби муаммолари етарли даражада тадқиқ этилмаганлигини кўрсатди. Шу сабабли юпқа конструкцияларнинг турли хил такрорий юкланишларда материалларнинг емирилишини ҳисобга олган ҳолда деформацияланиши жараёнини моделлаштириш, шунингдек кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатларини тадқиқ этиш учун ҳисоблашнинг самарали услублари ва алгоритмларини, ҳамда дастурий воситаларни ишлаб чиқиш зарурати юзага келмоқда.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент темир йўл муҳандислари институтининг №А14-010 «Турли хил юкланишларда цистерна типдаги қўшма қобик конструкцияларининг кам цикли мустаҳкамлиги ва динамикасини тадқиқ этишнинг самарали услубларини ишлаб чиқиш» амалий гранти (2015-2017) ва № Ф4-019 «Такрорий юкланишлар ва чекли деформацияланишларда қовушқоқ эластик-пластик конструктив элементларни ҳисоблаш назарияси ва усуллари-нинг илмий асосларини ишлаб чиқиш» фундаментал гранти (2017-2020) илмий-тадқиқот ишлари режасига мувофиқ бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади турли юкланишдаги қобикли конструкциялар деформацияланишининг математик моделларини, шунингдек турли чегаравий ва бошланғич шартларда юпқа конструкциялар элементларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати таҳлили учун ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларни ишлаб чиқиш.

Тадқиқот вазифалари:

ўққа нисбатан симметрик қобик конструкцияларнинг ҳисоб схемасини шакллантириш, геометрик ва физик муносабатларни қуриш, вариацион мувозанат тенгламасини тузиш;

шпангоут билан мустаҳкамланган ўққа нисбатан симметрик қобик конструкцияларнинг мувозанати ва ҳаракат ҳолатининг вариацион тенгламасини келтириб чиқариш;

цилиндрик ва сферик қобик конструкциянинг деформацияланишини ҳисоблаш моделларини ишлаб чиқиш;

умумлашган усул асосида цилиндрик ва сферик қобик конструкциялар элементларини ҳисоблаш алгоритмларини ва дастурий таъминотини такомиллаштириш;

цилиндрик қобик учун ярим моментсиз қобиклар назарияси асосида ҳисоблаш усулини ишлаб чиқиш ва кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини тадқиқ қилиш;

Такрорий юкланишлар таъсиридаги стерженларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини таҳлил қилиш;

цилиндрик қобикнинг кучланганлик деформацияланганлик ҳолатини ANSYS комплекс программаси асосида таҳлил қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида қобик конструкциялар, цистерна элементлари ва турли юкланишлар таъсиридаги юпқа деворли стерженлар модели олинган.

Тадқиқот предмети деформацияланиш моделлари, ҳисоблаш алгоритмлари, қобикли конструкцияларни кучланганлик деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблаш усуллари ва дастурлари ташкил этилади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқотлар жараёнида эластиклик ва пластиклик назариялари, қобиклар назарияси, вариацион принциплар, сонли усуллар, чекли айирмалар схемаси ва дастурлаш технологияларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

Гамильтон-Остроградскийнинг вариацион принципи асосида шпангоутлар билан мустаҳкамланган қобик конструкцияларнинг деформацияланиш модели яратилган;

цилиндрик ва сферик қобик конструкцияларнинг деформацияланишининг аниқлаштирилган ҳисобий модели ишлаб чиқилган;

статик ва динамик юкланишларда цилиндрик ва сферик қобик учун чегаравий масалани ҳал қилиш услублари ишлаб чиқилган;

Юпқа қобик конструкциянинг – цистерна элементлари ҳисобини дастурий воситалари ишлаб чиқилган;

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Турли хил юкланишлар таъсирида шпангоутлар билан мустаҳкамланган қобик конструкцияларни деформацияланишининг математик моделлари ишлаб чиқилган;

эластик қобик конструкциялар – цилиндрик ва сферик қобикларни ҳисоблаш услубиёти ишлаб чиқилган;

турли хил юкланишлар таъсирида чегаравий масалаларни ечиш жараёнларини алгоритмлаш ва қобик конструкцияларнинг кучланганлик деформацияланганлик ҳолати кинетикасини таҳлил қилиш имконини берадиган дастурлар мажмуи ишлаб чиқилган (№ DGU 05551);

турли хил юкланишлар таъсиридаги юпқа қобикли конструкцияларнинг емирилиши ҳисобга олинган ҳолда юк кўтарувчи элементларнинг ҳисоблаш дастури ишлаб чиқилган (№ DGU 08226);

ANSYS комплекс дастури асосида цистерна элементларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати тадқиқ қилинган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Лагранж ва Гамильтон-Остроградскийларнинг вариацион принципи асосида, замонавий сонли усуллар ва қобиклар назариясидан фойдаланганлиги, шунингдек масала ечимларини бошқа муаллифлар ишлари билан таққослаб текширилганлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, қобикли конструкциялар деформацияланишининг чизикли ва ночизикли жараёнларида қатор янги масалаларни математик моделлаштириш услубиёти тақдим этилганлиги, сонли-аналитик услублар асосидаги универсал ва самарали алгоритмлар яратилганлиги, шунингдек цистерна типдаги қобикли конструкцияларнинг кучланганлик-деформацияланган ҳолатини ҳисоблаш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти ишлаб чиқилган математик моделлар, алгоритмлар ва дастурий таъминот лойиҳа ташкилотлари ва илмий-тадқиқот институтларида фойдаланиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Статик ва динамик юкланишдаги қобикли конструкцияларнинг деформацияланишини математик моделларини, шунингдек турли чегаравий ва бошланғич шартларда қобик конструкциялар элементларини кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини таҳлили учун ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситаларни ишлаб чиқиш бўйича олинган натижалар асосида:

ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритмлари, чекли айирмалар усули асосида қурилган дискрет схемалар ва яратилган дастурлар мажмуаси «Tashkent metropoekt» МЧЖ корхоналари объектларга жорий этилган (Ўз.Р Қурилиш вазирлигининг 9.09.2019 даги №6576/09-07-сонли татбиқ этилганлик тўғрисидаги маълумотномаси). Натижада, дастурий таъминот ҳисоблаш жараёнининг юқори аниқлилиги, ишлаб чиқилган услублар самарадорлиги лойиҳа ишлари унумдорлигини 12-18% га ошириш ва ҳисоблаш жараёнини 2 марта камайтириш имконини берди;

ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритмлари, чекли айирмалар усулидан фойдаланиб цилиндрик қобик конструкциялар статик юкланишларда деформацияланишининг математик моделлари ва яратилган дастурий мажмуа “Ўзоғирсаноатлойиха” АЖ объектларида татбиқ этилган (Ўз.Р Қурилиш вазирлигининг 9.09.2019 даги №6576/09-07-сонли татбиқ этилганлик тўғрисидаги маълумотномаси). Натижада, дастурий таъминот юқори аниқлиги ва ишлаб чиқилган усуллар самарадорлиги ҳисоблаш жараёнини 1,5 марта камайтириш ва лойиха ишлари унумдорлигини 10-15% га ошириш имконини берди.

Умумлаштирилган модель асосида яратилган дискрет моделлар ва дастурий мажмуа “Қуюв-механика заводи” ШК объектларида татбиқ этилган (“Қуюв-механика заводи” 13.05.2019 даги баённомаси). Ишлаб чиқилган дастур ҳисоблаш жараёни муддатини 1,5 марта қисқартириб, лойиха ишлари аниқлиги ва самарадорлигини 15-20% га ошириш имконини берди.

Олинган илмий натижаларнинг лойихалаштириш амалиётига татбиқ этилиши оқилона ва техник ечимларни излашнинг такрорланишлар сонини қисқартириш, конструкциянинг материаллари моддий харажатини камайтириш, тажриба тадқиқотлар ҳажми ва уларни ўтказиш харажатларини пасайтириш, кучланганлик-деформацияланган ҳолатини ҳисоблашнинг аниқлигини ва юпқа деворли конструкциялар емирилишини камайтириш имконини яратади.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 3 та халқаро ва 14 та республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларда муҳокама қилинди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича 39 та илмий иш чоп этилган. Улардан 1 та монография, 19 та илмий мақола, шу жумладан 3 таси хорижий ва 16 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан фалсафа доктори диссертацияси (PhD) бўйича асосий илмий натижаларни чоп этиш учун тавсия этилган республика журналларида, шунингдек ЭҲМда дастурий воситаларни рўйхатга олинганлиги тўғрисида 2 та гувоҳнома олинган.

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

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланиб, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти ва предмети белгиланиб, тадқиқотнинг Республика фан ва технологияларини ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мувофиқлиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилди, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилмаси тўғрисида маълумотлар келтирилди.

Диссертациянинг “�ўққа нисбатан симметрик қобик конструкциялар деформацияланишининг математик моделлари” номли бобда юпқа қобик конструкцияларни деформацияланишини математик моделлаштириш муаммоларига бағишланган илмий ишлар таҳлил қилинган.

Иккинчи бўлимда қобик конструкцияларнинг элементлари учун ҳисоб схемаси, геометрик ва физик муносабатлар келтирилган. Ҳисоб схемасини шакллантиришда, Мяченков-Мальцев назариясига мувофиқ қобик конструкциялар айланма қобиклар, шпангоутларга (ҳалқаларга) бўлинади. Қобик элементлар учун Кирхгоф-Ляв гипотезаси ўринли деб қабул қилинади. Шпангоутларнинг кўндаланг кесимлари доиравий ҳалқа схемаси бўйича кўрилган.

Қобик элементларнинг физик хусусиятларини тасвирлаш учун Гукнинг умумлашган қонуни қўлланилади. Қобик ва ҳалқасимон элементлар учун кучланганлик, деформация ва кўчишлар ўртасидаги муносабатлар келтирилган. Қобик конструкциянинг мувозанат тенгламаларини олиш учун Лагранжнинг вариацион принциpidан фойдаланилган.

Ўрта сиртга параллел бўлган қобик элементининг деформациялари қуйидаги формула билан ифодаланади:

$$\varepsilon_{11}^z = \varepsilon_{11} + z\chi_{11}; \varepsilon_{22}^z = \varepsilon_{22} + z\chi_{22}; \varepsilon_{12}^z = \varepsilon_{12} + z\chi_{12}. \quad (1)$$

Қобикли конструкцияларнинг элементларини ҳаракат тенгламасини олиш учун Гамильтон – Остроградский тенгламасидан фойдаланилди:

$$\delta \int_t (\delta T - \delta \Pi + \delta A) dt = 0 \quad (2)$$

Кинетик, потенциал энергия вариациясини ва ташқи кучлар иши қуйидаги муносабатлардан аниқланди:

$$\begin{aligned} \delta \Pi &= \int_V (\sigma_{11} \delta \varepsilon_{11}^z + \sigma_{12} \delta \varepsilon_{12}^z + \sigma_{22} \delta \varepsilon_{22}^z) dV; \\ \delta A &= \int_V (P_1 \delta u_1 + P_2 \delta u_2 + P_3 \delta u_3) dV + \int_S (q_1 \delta u_1 + q_2 \delta u_2 + q_3 \delta u_3) dS + ; \\ &+ \int_{S_1} (f_1 \delta u_1 + f_2 \delta u_2 + f_3 \delta u_3) dS_1|_{\alpha_1} + \int_{S_2} (\varphi_1 \delta u_1 + \varphi_2 \delta u_2 + \varphi_3 \delta u_3) dS_2|_{\alpha_2}; \\ \delta T &= \iiint_V \left[\rho \frac{\partial u_1}{\partial t} \delta \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_2}{\partial t} \delta \frac{\partial u_2}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_3}{\partial t} \delta \frac{\partial u_3}{\partial t} \right] dv dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Геометрик муносабатлар ва Гук қонунига кўра, шунингдек шакллантирилган (3) муносабатлар асосида ва уларни вариацион принцип (2) га қўйиш билан қобик элементлари учун мувозанат тенгламалари олинган.

Шунингдек, Гамильтон-Остроградскийнинг вариацион принципи асосида қобик конструкцияларнинг нозикли деформацияланишини математик моделлари ишлаб чиқилган. Х.М.Муштари назариясига кўра, қобиклар эгилиши ўртача ҳисобланиб, деформация компонентлари чекли кўчишлар орқали ифодаланган. Натижада, қобик элементлари учун ҳаракатнинг вариацион тенгламаси келтириб чиқарилган.

Диссертациянинг «**Цилиндрик қобик конструкциянинг математик моделини ва ҳисоблаш алгоритмларини шакллантириш**» номли иккинчи бобида қобикларнинг моментлар назарияси ва вариацион принцип асосида цилиндрик қобик конструкциялар деформацияланишининг аниқлаштирилган ҳисоблаш модели ишлаб чиқилган. Чегаравий ва бошланғич шартли дифференциал тенгламалар системаси олинган. Чегаравий масалаларни ечиш учун сонли усуллардан фойдаланилган.

Цилиндрик қобик учун геометрик ва физик муносабатлар келтирилган. Қобикнинг ўрта сирти эгри чизикли ортогонал координаталар тизимига $\alpha = z/L$, $\beta = s/R$ жойлаштирилган деб қаралади. В.З.Власовнинг қобиклар назариясига биноан нормалдаги ўрта сиртидан γ масофадаги қобик жисмининг ихтиёрий нуқтасининг кўчиши қуйидаги кўринишда тақдим этилган:

$$U_\alpha = (1 + k_1\gamma)U - \frac{\gamma}{A} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha}, \quad U_\beta = (1 + k_2\gamma)V - \frac{\gamma}{B} \cdot \frac{\partial W}{\partial \beta}, \quad U_\gamma = W(\alpha, \beta). \quad (4)$$

Кўчишлар ифодаси (4), Ламе коэффицентлари ва уларнинг нисбатларини $(\gamma k_i)^2$ аниқлик билан ўзгарувчан γ бўйича қатор кўринишидаги муносабатларни ҳисобга олиб,

$$\frac{1}{H_2} = \frac{1}{B}(1 - k_2\gamma + k_2^2\gamma^2); \quad \frac{H_2}{H_1} = \frac{B}{A}(1 + k_2\gamma); \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{A}{B}(1 - k_2\gamma + k_2^2\gamma^2),$$

деформациялар учун қуйидаги аниқлаштирилган формулалар олинган:

$$e_{\alpha\alpha} = \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \alpha} - \frac{\gamma}{R^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2}, \quad e_{\beta\beta} = \frac{\partial V}{R \partial \beta} - (\gamma - k_2\gamma^2) \frac{\partial^2 W}{R^2 \partial \beta^2} + (1 - k_2\gamma + k_2^2\gamma^2) \cdot k_2 W,$$

$$e_{\alpha\beta} = (1 - k_2\gamma + k_2^2) \frac{\partial U}{B \partial \beta} - (\gamma - k_2\gamma^2) \frac{\partial^2 W}{AB \partial \alpha \partial \beta} + (1 + k_2\gamma) \frac{\partial V}{A \partial \alpha} - \frac{\gamma}{AB} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha \partial \beta}; \quad (5)$$

ҳажмий кенгайиш учун

$$\Delta = \frac{\partial U}{A \partial \alpha} - \frac{\gamma}{A^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial V}{B \partial \beta} - (\gamma - k_2\gamma^2) \frac{\partial^2 W}{B^2 \partial \beta^2} + (1 - k_2\gamma + k_2^2\gamma^2) \cdot k_2 W \quad (6)$$

Цилиндрик қобик эластиклик чегарасида юкланган деб ҳисобланади. Бу ҳолда кучланиш компонентлари Гукнинг умумлашган қонунига кўра топилади:

$$\sigma_\alpha = (\lambda + 2\mu)\Delta - 2\mu(e_{\beta\beta} + e_{\gamma\gamma}); \quad \sigma_\beta = (\lambda + 2\mu)\Delta - 2\mu(e_{\alpha\alpha} + e_{\gamma\gamma}); \quad \tau_{\alpha\beta} = \mu e_{\alpha\beta}. \quad (7)$$

Цилиндрик қобик конструкцияларнинг ҳаракати тенгламасини олиш учун Гамильтон-Остроградский вариацион принцидан (2),(3) фойдаланилди. Кўчишлар (4), деформациялар (5),(6), умумлаштирилган Гук қонуни (7) ифодаларини, ҳамда бўлақлаб интеграллашни ҳисобга олиб, баъзи белгилашларни киритган ҳолда, чегаравий ва бошланғич шартли ҳаракатнинг дифференциал тенгламалари системаси олинган.

Чегаравий масалаларни ҳал қилиш учун Бубнов-Галеркин усули қўлланилган:

$$U = \sum_n U_n(\alpha, t) \cos \frac{n\pi\beta}{\beta_1}, \quad V = \sum_n V_n(\alpha, t) \sin \frac{n\pi\beta}{\beta_1}, \quad W = \sum_n W_n(\alpha, t) \cos \frac{n\pi\beta}{\beta_1}. \quad (8)$$

Баъзи ўзгартиришлардан сўнг цилиндрик қобиклар учун қуйидаги кўринишдаги дифференциал тенгламалар системасига эга бўлинди:

$$\begin{aligned} & -\alpha_1^{(1)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial t^2} + \alpha_2^{(1)} \frac{\partial^4 W_n}{\partial t^2 \partial \alpha^2} - \alpha_3^{(1)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial t^2} - \alpha_4^{(1)} \frac{\partial^4 W_n}{\partial \alpha^4} + \alpha_5^{(1)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial \alpha^2} - \alpha_6^{(1)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} - \alpha_7^{(1)} W_n - \alpha_8^{(1)} V_n + Z_n = 0; \\ & -\alpha_1^{(2)} \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} + \alpha_2^{(2)} \frac{\partial^2 U_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_4^{(2)} \frac{\partial V_n}{\partial \alpha} + \alpha_3^{(2)} \frac{\partial W_n}{\partial \alpha} - \alpha_5^{(2)} U_n + X_n = 0; \\ & -\alpha_2^{(3)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial t^2} + \alpha_1^{(3)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial t^2} - \alpha_4^{(3)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} + \alpha_3^{(3)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_5^{(3)} W_n - \alpha_6^{(3)} V_n + Y_n = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

чегаравий шартлар:

$$\begin{aligned} & \left[-(\lambda + 2\mu) \cdot h \frac{\partial U}{R \partial \alpha} - \lambda h \frac{\partial V}{R \partial \beta} - \lambda k_2 \frac{h^3}{12 R^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2} - \lambda \cdot \left(h + k_2 \frac{h^3}{12} \right) k_2 W + N(\varphi_1) \right] \delta U|_{\alpha} = 0; \\ & \left[-\mu \left(h + k_2 \frac{h^3}{12} \right) \frac{\partial U}{R \partial \beta} - \mu h \frac{\partial V}{R \partial \alpha} - \mu k_2 \frac{h^3}{12 R^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha \partial \beta} + N(\varphi_2) \right] \delta V|_{\alpha} = 0; \\ & \left[(\lambda + 2\mu) \frac{h^3}{12 R^3} \frac{\partial^3 W}{\partial \alpha^3} + \lambda \frac{h^3}{12 R^3} \frac{\partial^3 W}{\partial \alpha \partial \beta^2} + \lambda k_2 \frac{h^3}{12 R} \frac{\partial W}{\partial \alpha} + 2\mu k_2 \frac{h^3}{12 R^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \beta^2} - \right. \\ & \left. - \mu k_2 \frac{h^3}{12 R^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \alpha \partial \beta} + 4\mu \frac{h^3}{12 R^3} \frac{\partial^3 W}{\partial \alpha \partial \beta^2} + Q(\varphi_3) + \frac{\partial M(\varphi_2)}{R \partial \beta} \right] \delta W|_{\alpha} = 0; \\ & \left[-(\lambda + 2\mu) \frac{h^3}{12 R^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} - \lambda \frac{h^3}{12 R^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2} - \lambda k_2 \frac{h^3}{12} W - M(\varphi_1) \right] \delta \frac{\partial W}{R \partial \alpha}|_{\alpha} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

бошланғич шартлар:

$$\begin{aligned} & \rho h \frac{\partial U}{\partial t} \delta U|_t = 0; \quad \left[\rho \left(h + k_2 \frac{h^3}{12} \right) \frac{\partial V}{\partial t} - \rho k_2 \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{\partial t R \partial \beta} \right] \delta V|_t = 0; \\ & \left[\rho h \frac{\partial W}{\partial t} - \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 W}{\partial t R^2 \partial \alpha^2} + \rho k_2 \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 V}{\partial t R \partial \beta} - \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 W}{\partial t R^2 \partial \beta^2} \right] \delta W|_t = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Дифференциал тенгламалар тизими (9) ни векторли шаклда ёзиш мумкин

$$A_1 \ddot{U}_n + A_2 \ddot{U}_n'' + A_3 U_n^{IV} + A_4 U_n'' + A_5 U_n' + A_6 U_n + F_n = 0. \quad (12)$$

бунда: $U_k = (W_k, U_k, V_k)^T$, $F_k = (Z_k, X_k, Y_k)^T$; A_i - учинчи тартибли матрица.

Чегаравий масалалар (12), (10) ва (11) ни ечиш учун аниқлаштирилган иккинчи тартибли чекли айирмалар усули қўлланилди. Марказий-айирмали формулалардан фойдаланиб, қуйидаги алгебраик тенгламалар тизими олинди:

$$\begin{aligned} & B_n U_{n,i-1}^{k+1} + C_n U_{n,i}^{k+1} + B_n U_{n,i+1}^{k+1} + \bar{A}_n U_{n,i+1}^{k+1} + \bar{B}_n U_{n,i-1}^k + \bar{C}_n U_{n,i}^k + \bar{D}_n U_{n,i+1}^k + \\ & + \bar{A}_n U_{n,i+2}^k + \bar{B}_n U_{n,i-1}^{k-1} + C_n U_{n,i}^{k-1} + B_n U_{n,i+1}^{k-1} + \tau^2 F_{n,i}^k = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Аппроксимациядан сўнг бошланғич шарт (11) қуйидаги кўриниш олади:

$$\left[\bar{M}_1 U_{n,i-1}^{k+1} + \bar{M}_2 U_{n,i}^{k+1} + \bar{M}_3 U_{n,i+1}^{k+1} - \bar{M}_1 U_{n,i+1}^{k+1} - \bar{M}_1 U_{n,i-1}^{k-1} - \bar{M}_2 U_{n,i}^{k-1} - \bar{M}_3 U_{n,i+1}^{k-1} \right]_0 h \delta U_{n,i+1}^{k-1} = 0. \quad (14)$$

Айирмали чегаравий масалани ечиш “хайдаш” услуби ёрдамида ҳал қилинди. Кўчишлар ва уларнинг тезликлари бошланғич вақт учун берилган деб фараз қилинади. Цилиндрик қобик $\alpha = 0$ ва $\alpha = 1$ бўлганда маҳкамланган деб ҳисобланади. Вектор кўринишда чегаравий шартлар қуйидагича ифодаланади:

$$U_{n,0}^j = 0; A'U_{n,-1}^j = A'U_{n,1}^j; U_{n,N}^j = 0; A'U_{n,N+1}^j = A'U_{n,N-1}^j. \quad (15)$$

Айирмали тенгламалар системаси (13) ни чегаравий шартлар (15) ҳисобга олган ҳолда $i = 1, 2, \dots, N-1$ учун қайта ёзамиз, натижада бу система қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$B_n U_{n,i-1}^{k+1} + C_n U_{n,i}^{k+1} + B_n U_{n,i+1}^{k+1} = b_{n,j}, \quad (16)$$

бунда: $b_{n,i} = \tau^2 F_{n,i}^k - (\bar{A}_n U_{n,i-2}^k + \bar{B}_n U_{n,i-1}^k + \bar{C}_n U_{n,i}^k + \bar{D}_n U_{n,i+1}^k + \bar{A}_n U_{n,i+2}^k + B_n U_{n,i-1}^{k-1} + C_n U_{n,i}^{k-1} + B_n U_{n,i+1}^{k-1})$.

(16) тенгламадан i -чи тенглама учун ечимни ёзиб олиш мумкин:

$$U_{n,i}^{k+1} = f_i - H_i U_{n,i+1}^{k+1}, \quad (17)$$

бунда: $f_i = (C_n - B_n H_{i-1})^{-1} (b_{n,i} - B_n f_{i+1})$, $H_i = (C_n - B_n H_{i-1})^{-1} B_n$.

Тескари “хайдашда” кўчишлар вектори $U_{n,i}^k$ нинг қолган қийматлари аниқланади.

Диссертациянинг «Сферик қобик конструкциянинг математик моделини шакллантириш» деб номланган учинчи бобида Гамильтон-Остроградский принципидан фойдаланиб, сферик қобик конструкцияси учун зўриқиш кучлари ва кўчиш орқали ҳаракат (мувозанат) вариацион тенгламаси олинган. Бубнов-Галеркин усулини қўллаб хусусий ҳосилалар, тегишли чегаравий ва бошланғич шартларга эга бўлган дифференциал тенгламалар системаси олинган.

Ушбу масалада кўчиш компонентлари қуйидаги кўринишда ифодаланган:

$$\begin{aligned} U_\alpha &= (1 + k_1 \gamma) U - \frac{\gamma}{A} \frac{\partial W}{\partial \alpha} = (1 + k_1 \gamma) U - \gamma \frac{\partial W}{R \partial \alpha}; \\ U_\beta &= (1 + k_2 \gamma) V - \frac{\gamma}{B} \frac{\partial W}{\partial \beta} = (1 + k_2 \gamma) V - \gamma \frac{\partial W}{R \sin \alpha \partial \beta}; \quad U_\gamma = W(\alpha, \beta). \end{aligned} \quad (18)$$

Деформациялар қуйидаги формулалар бўйича топилган ($(\gamma k_i)^2$ -аниқлик билан):

$$\begin{aligned} e_{\alpha\beta} &= \frac{\partial u}{R \sin \alpha \partial \beta} + \frac{\partial v}{R \partial \alpha} - 2(\gamma - k_2 \gamma^2) \frac{\partial^2 w}{R^2 \sin \alpha \partial \alpha \partial \beta} - \frac{\cos \alpha}{R \sin \alpha} V + (\gamma - k_2 \gamma^2) \frac{2 \cos \alpha}{R^2 \sin \alpha} \frac{\partial w}{\partial \beta}; \\ e_{\beta\beta} &= \frac{\partial v}{R \sin \alpha \partial \beta} - (\gamma - k_2 \gamma^2) \frac{\partial^2 w}{R^2 \sin^2 \alpha \partial \beta^2} + \frac{\cos \alpha}{R \sin \alpha} U - (\gamma - k_2 \gamma^2) \frac{\cos \alpha}{R^2 \sin \alpha} \frac{\partial w}{\partial \alpha} + k_1 W (1 - k_1 \gamma + k_1^2 \gamma^2); \\ e_{\alpha\alpha} &= \frac{\partial u}{R \partial \alpha} - (\gamma - k_1 \gamma^2) \frac{\partial^2 w}{R^2 \partial \alpha^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

Сферик қобик конструкциялар учун Гамильтон-Остроградскийнинг вариацион принципи ва Бубнов-Галеркин усулларидан фойдаланиб, тегишли чегаравий ва бошланғич шартларга эга қуйидаги аниқлаштирилган дифференциал тенгламалар системаси олинган:

$$\begin{aligned}
& -\alpha_1^{(3)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial t^2} - \alpha_4^{(3)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial t^2} - \alpha_2^{(3)} \frac{\partial^3 U_n}{\partial t^2 \partial \alpha} + \alpha_8^{(3)} \frac{\partial^4 W_n}{\partial t^2 \partial \alpha^2} - \alpha_6^{(3)} \frac{\partial^4 W_n}{\partial \alpha^4} - \alpha_5^{(3)} \frac{\partial^3 U_n}{\partial \alpha^3} - \alpha_9^{(3)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \alpha^2} + \\
& + \alpha_7^{(3)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_{11}^{(3)} \frac{\partial W_n}{\partial \alpha} + \alpha_{14}^{(3)} \frac{\partial V_n}{\partial \alpha} + \alpha_{13}^{(3)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} - \alpha_8^{(3)} W_n - \alpha_{12}^{(3)} U_n - \alpha_{10}^{(3)} V_n + Z_n = 0; \\
& -\alpha_1^{(1)} \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} + \alpha_3^{(1)} \frac{\partial^3 W_n}{\partial t^2 \partial \alpha} + \alpha_4^{(1)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \alpha^2} - \alpha_8^{(1)} \frac{\partial^3 W_n}{\partial \alpha^3} + \alpha_2^{(1)} \frac{\partial^2 U_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_5^{(1)} \frac{\partial W_n}{\partial \alpha} + \alpha_9^{(1)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} + \alpha_6^{(1)} \frac{\partial V_n}{\partial \alpha} + \\
& + \alpha_8^{(1)} W_n - \alpha_{10}^{(1)} U_n - \alpha_7^{(1)} V_n + X_n = 0; \\
& -\alpha_2^{(2)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial t^2} - \alpha_1^{(2)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial t^2} - \alpha_8^{(2)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_9^{(2)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \alpha^2} - \alpha_5^{(2)} \frac{\partial W_n}{\partial \alpha} - \alpha_7^{(2)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} - \alpha_{10}^{(2)} \frac{\partial V_n}{\partial \alpha} + \\
& + \alpha_4^{(2)} W_n - \alpha_6^{(2)} U_n - \alpha_3^{(2)} V_n + Y_n = 0.
\end{aligned} \tag{20}$$

Ушбу системани ва бошланғич шартларни вектор кўринишда ифодалаймиз:

$$A_1 \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} + A_2 \frac{\partial^4 U_n}{\partial t^2 \partial \alpha^2} + A_3 \frac{\partial^3 U_n}{\partial t^2 \partial \alpha} + A_4 \frac{\partial^4 U_n}{\partial \alpha^4} + A_5 \frac{\partial^3 U_n}{\partial \alpha^3} + A_6 \frac{\partial^2 U_n}{\partial \alpha^2} + A_7 \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} + A_8 U_n + EF_n = 0; \tag{21}$$

$$\left[B_1 \frac{\partial U_n}{\partial t} + B_2 \frac{\partial^2 U_n}{\partial t \partial \alpha} + B_3 \frac{\partial^3 U_n}{\partial t \partial \alpha^2} \right] h \delta U_n \Big|_t = 0. \tag{22}$$

Хусусий ҳолда, статик юкланишда (21) дан қуйидагига эга бўламиз:

$$A_4 U^{IV} + A_5 U^{III} + A_6 U^{II} + A_7 U^I + A_8 U + EF_n = 0. \tag{23}$$

(20), (21) ва (22) чегаравий масалаларни ҳал қилишда иккинчи тартибли аниқлик билан чекли айирмалар усулини қўллаб, (16) кўринишдаги алгебраик тенгламалар системаси олинган. “Ҳайдаш” усулини қўллаш билан ечиш йўли кўрсатилган.

Диссертациянинг «Турли хил юкланишларда юпқа конструкцияларнинг кучланганлик деформацияланганлик ҳолатининг сонли алгоритмини ҳисоблаш ва тадқиқ қилиш» деб номланган тўртинчи бобда қобик конструкцияларнинг деформацияланишини ҳисоблаш масаласини моделлаштириш, дастурий таъминот мажмуининг тузилиши ва интерфейсдан фойдаланиш бўйича кўрсатмалар, цилиндрик қобикнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати таҳлили натижалари келтирилган. Жумладан, цистерна ўзагини ҳисоблаш В.З.Власовнинг қобиклар учун яриммоментсиз назарияси асосида таҳлил қилинган.

Биринчи бўлимда статик юкланишлар остидаги цилиндрик қобик конструкцияларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблашнинг компьютер реализацияси ва дастурий таъминоти ишлаб чиқилган.

Яратилган дастурий мажмуа (C#) бир нечта класслардан ташкил топган. Объектга йўналтирилган дастурлашда класс - калит сўз ҳисобланади. Класс маълумот ва кодлардан ташкил топган бўлиб, у дастурни бошқаради. Класс конструктори-бу янги объект қуришда чақириладиган ва класс майдонларини қийматлар билан бошлаш ва дастлабки ҳисоблашларни бажариш учун

ишлатиладиган махсус усул.

Чекли айирмалар ва вариацион усуллар асосида ишлаб чиқилган ел классификациясидаги асосий қисмлардан ташкил топган:

Ташкилий усуллар: $\text{double}[] a(\text{int } i)$, $\text{double}[] b(\text{int } i)$, $\text{double}[] c(\text{int } i)$, $\text{double}[] c(\text{int } i)$. Ҳар бир усул 16 та қийматга эга ва i ўзгарувчига қараб, коэффициентнинг янги қийматини олади.

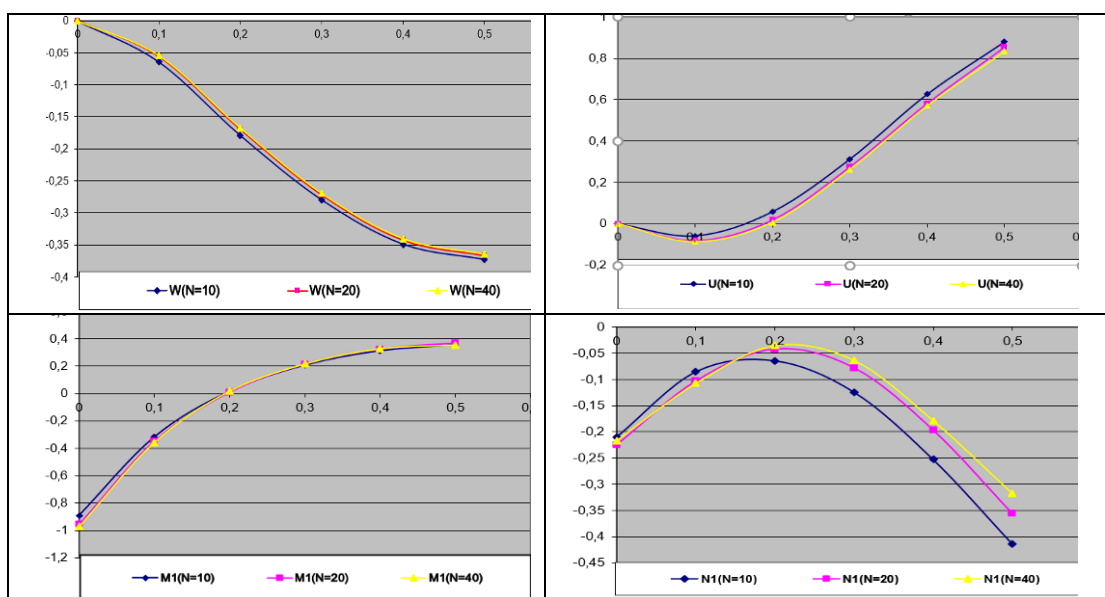
Асосий тенглама коэффициентларини ҳисоблаш усуллари: $\text{double}[,] A(\text{int } t)$, $\text{double}[,] B(\text{int } t)$, $\text{double}[,] C(\text{int } t)$, $\text{double}[,] D(\text{int } t)$, $\text{double}[,] E(\text{int } t)$. Ушбу усуллар t ўзгарувчининг қийматига қараб 3×3 икки ўлчовли массив ҳосил қилади.

Чекли айирмалар коэффициентларини ҳисоблаш усуллари: $\text{double}[,] Ak(\text{int } k)$, $\text{double}[,] Bk(\text{int } k)$, $\text{double}[,] Ck(\text{int } k)$, $\text{double}[,] Dk(\text{int } k)$, $\text{double}[,] Ek(\text{int } k)$. Чекли айирмалар усулини қўллагандан кейин, k нинг қийматига қараб, 3×3 икки ўлчовли массив ҳосил қилади.

Чекли айирмалар системаси ёрдамида тенгламаларни ечиш усуллари: `ryamhond` усулини қўллагандан сўнг, кўчиш векторининг қийматлари олинади. Кўчиш векторининг ҳисобланган қийматлари асосида, ҳар бир тугунга мос зўриқиш векторлари ҳисобланади.

Дастурлар мажмуи диалог режимида ишлайди. Яратилган интерфейс ҳисоблаш натижаларининг жадвал ва графиклар кўринишида чиқаришни, шунингдек кейинчалик кўриб чиқиш ва таҳлил қилиш мақсадида алоҳида файлларга ёзиб олиниши имконини беради.

Икки тарафдан қотириб маҳкамланган цилиндрик қобик учун олинган ҳисоб натижалари график кўринишида келтирилган. Шу билан бирга ҳисобий натижаларни тақсимооти тўрнинг турли қийматларида кўрсатилган. Ҳисобий қийматларни яқинлаштиришни таҳлили амалий ҳисобларда $N=40$ бўлиши етарли деб ҳисобланади (расм-1).



1-расм. Ҳисобий миқдорларнинг ўзгариши: Кўчиш компонентлари W , U ва зўриқиш кучлари M_1 , N_1 ларнинг тўрнинг турли қийматларида қобикнинг узунлиги бўйича ўзгариши.

Цилиндрик қобик конструкциялар цистерна ўзагининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати таҳлили учун асосий муносабатларни чиқаришда, хусусан, В.З.Власовнинг яриммоментсиз назарияси қўлланилган. Масаланинг ечими қуйидаги қатор кўринишида изланади:

$$V = \sum_{n=2}^{\infty} V_n(\alpha) \sin n\beta, \quad W_n(\alpha) = \sum_{n=2}^{\infty} V_n(\alpha) n \cos n\beta, \quad U_n(\beta) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\partial V_n(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{n} \cos n\beta \quad (24)$$

Муайян ўзгартиришлардан сўнг, масала $V_n(\alpha)$ га нисбатан бир жинсли ўзаро боғлиқ бўлмаган чексиз тенгламалар тизимига келтирилади.

Таянч кесимларда $z=0$ ва $z=l$ ҳалқа билан кучайтирилган цилиндрлик қобикни ҳисоблаш жараёни кўриб чиқилган. Қобик муайян N даражага қадар унинг деворига нормал босим $p_n = p_n(s)$ ҳосил қиладиган суюқлик билан тўлдирилган деб ҳисобланади. Суюқлик босими P_n Вершинскийга кўра қуйидаги формула асосида аниқланган:

$$p_n = -\tilde{\gamma}R(\cos \beta - \cos \beta_0) \quad (25)$$

бунда $\tilde{\gamma}$ - суюқликнинг ҳажмий оғирлиги, β_0 - қобикнинг тўлиш даражасини тавсифловчи марказий бурчак.

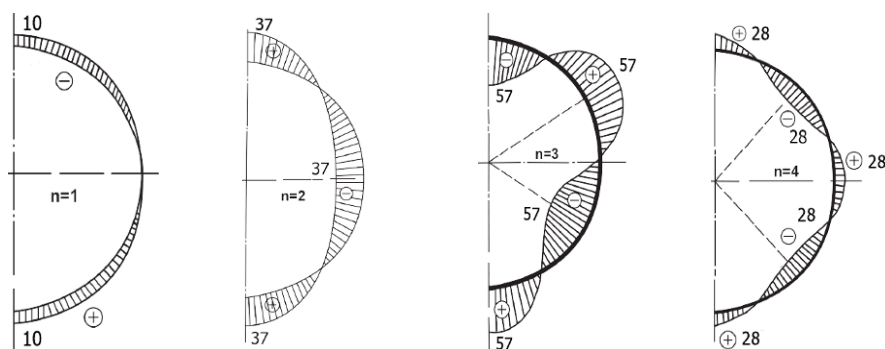
1-жадвалда β_0 нинг турли қийматлари учун цилиндрлик қобик – цистерна ўзагини ҳисоблаш натижалари келтирилган (мазкур кесим учун $z=l/2$), қуйидаги бошланғич маълумотларда: $R=150$ см; $l=1120$ см; $h=0.6$ см; $\beta_0=33^\circ$; $\tilde{\gamma}=0.001\text{кг}/\text{см}^2$;

1-жадвал

Цилиндрлик қобик – цистерна ўзагини ҳисоблашнинг сонли натижалари

	β	$U(z,s) \cdot 10^2$	$V(z,s)$	$W(z,s)$	$M(z,s)$	$\sigma(z,s)$
n=2	0	0.41391	0	-0.06221	-0.29862	36.74160
	$\pi/6$	0.20680	-0.02695	-0.03108	-0.14920	18.35741
	$\pi/3$	-0.20726	-0.02693	0.03115	0.14953	-18.39760
	$\pi/2$	-0.41391	0.00039	0.06221	0.29863	-36.74162
	$2\pi/3$	-0.20635	0.02697	0.03102	0.14888	-18.31710
	$5\pi/6$	0.20771	0.02691	-0.03122	-0.14986	18.43781
	π	0.41391	-0.00079	-0.06221	-0.29862	36.74152
n=3	0	0.64392	0	-0.21777	-2.78742	57.15900
	$\pi/6$	-0.00041	-0.07259	0.00014	0.00176	-0.03614
	$\pi/3$	-0.64392	0.00092	0.21777	2.78742	-57.15901
	$\pi/2$	0.00012	0.07259	-0.00042	-0.00529	0.10842
	$2\pi/3$	0.64392	-0.00018	-0.21777	-2.78741	57.15880
	$5\pi/6$	-1.00804	-0.07259	0.00069	0.00881	-0.18070
	π	-0.64392	0.00028	0.21777	2.78740	-57.15860

2-расмда цилиндрик қобик – цистерна ўзагининг кучланганлик ҳолати график кўринишида келтирилган.



2-расм. n нинг турли қийматларида ($n = 1, 2, 3, 4$) $z = l/2$ кесим учун нормал кучланишлар эпюраси келтирилган

2-расмдан кўриниб турибдики, қобик–цистерна қозонидаги кучланишлар тақсимланиши қаторнинг турли ҳадларида сезиларли фарқланади.

Қиёсий таҳлил мақсадида қўшма қобик конструкция–цистернанинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблаш ANSYS дастурини қўллаган ҳолда амалга оширилган (5-илова).

Учинчи бўлимда В.В.Москвитин назариясига асосан биржинсиз эластикпластиклик хусусиятига эга ва материалнинг емирилиши ҳисобга олинган ҳолда такрорий юкланишлар таъсиридаги юпқа деворли стерженларни ҳисоблашнинг компьютер реализацияси ишлаб чиқилган. Маълум чекланишлар ва фаразлар асосида такрорий юкланишлар таъсиридаги стержень нуқталарининг кўчишлари қуйидагича ифодаланади:

$$\begin{aligned} \bar{u}_1^{(n)} &= \bar{u}^{(n)} - y\bar{\alpha}_1^{(n)} - z\bar{\alpha}_2^{(n)} + \varphi\bar{v}^{(n)} + a_1\bar{\beta}_1^{(n)} + a_2\bar{\beta}_2^{(n)}; \\ \bar{u}_2^{(n)} &= \bar{v}^{(n)} - z\bar{\theta}^{(n)}, \bar{u}_3^{(n)} = \bar{w}^{(n)} + y\bar{\theta}^{(n)}, \end{aligned} \quad (26)$$

бу ерда $\bar{u}^{(n)} = (-1)^n(u^{(n-1)} - u^n)$, $\bar{\beta}_1^{(n)} = (-1)^n(\beta^{(n-1)} - \beta^n)$; $\bar{\alpha}_1^{(n)}, \bar{\alpha}_2^{(n)}$ –соф эгилишда n чи юкланишдаги кесимнинг бурилиш бурчаклари; $\bar{\beta}_1^{(n)}, \bar{\beta}_2^{(n)}$ –кўндаланг силжиш бурчаклари, $\bar{\theta}^{(n)}$ – буралиш бурчаги, $\bar{v}_1^{(n)}$ – узунлиги бўйича n чи юкланишдаги буралиш бурчаги, φ –буралиш функцияси.

Лагранжнинг вариацион принципи асосида, такрорий юкланишлар таъсиридаги юпқа деворли стерженларнинг мувозанат тенгламалари чиқарилган. Стерженнинг эластик-пластик хусусиятларини ва емирилишини эътиборга олиш учун А.П.Гусенков – Г.В.Москвитинларнинг такомиллаштирилган деформацияланиш диаграммасидан фойдаланилди.

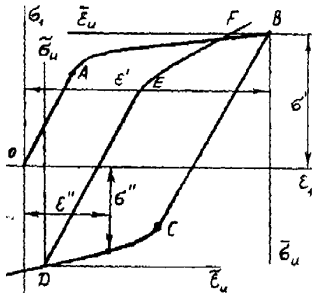
$$\frac{\bar{\varepsilon}_u^{(n)}}{\varepsilon_s} = \frac{\bar{\sigma}_u^{(n)}}{\sigma_s} + K_n \left(f \left(\frac{\bar{\sigma}_u^{(n)}}{2\sigma_s} \right) - 1 \right) + \frac{A - A^*}{A^*} K_n \left(1 - (-1)^{n-1} \right) \left(f \left(\frac{\bar{\sigma}_u^{(n)}}{2\sigma_s} \right) - 1 \right) \quad (27)$$

бу ерда K_n параметр қуйидаги муносабат билан аниқланади

$$K_n = A^* / (n-1)^\alpha, \quad K_n = A^* \exp(\beta(n-2)) \quad (28)$$

f функция бошланғич кучланиш диаграммасы ёрдамида аниқланади. A^*, A, α, β ўзгармаслар умумлашган циклик деформация параметрлари ҳисобланади ва тажриба ёрдамида аниқланади (3-расм).

Пластиклик функцияси чизиқли пухталаниш ҳолида қуйидаги формула бўйича аниқланади:



$$\omega^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{при } \bar{\varepsilon}_u^{(n)} \leq \bar{\varepsilon}_s^{(n)}(\eta) \\ \lambda_n \left[1 - \frac{\bar{\varepsilon}_s^{(n)}(\eta)}{\bar{\varepsilon}_u^{(n)}} \right], & \text{при } \bar{\varepsilon}_u^{(n)} > \bar{\varepsilon}_s^{(n)}(\eta) \end{cases}$$

3-расм. Циклик деформацияланиш диаграммасы

$$\bar{\varepsilon}_s^{(n)}(\eta) = \alpha_1^{n-z} (1 + \alpha_1) \varepsilon_s + (3G)^{-1} B^{1/\alpha} \cdot [1 - 0,5(1 + \alpha_1) \alpha_1^{n-2}] [1 - (1 - \eta)^{1+\alpha}]^{1/\alpha} (n-1)^{-1/\alpha}. \quad (29)$$

Бу ерда емирилиш функциясининг қиймати $\eta(n)$ ушбу кинетик тенгламадан:

$$\frac{d\eta}{d\lambda} = A \frac{(\bar{\sigma}_u^{(n)})^\alpha}{(1 - \gamma \eta^r)^\beta} \quad \text{ёки} \quad \eta = \frac{1+m}{B^{1+m}} \cdot \int_0^{\lambda_N} (\lambda_N - \mu)^m (\bar{\sigma}_u^{(n)})^{\alpha(1+m)} d\mu \quad (30)$$

қуйидаги шартларда $\eta(0) = 0$, $\eta(\lambda_N) = 1$ аниқланади. Бунда λ_N – емирилиш содир бўлгунга қадар цикллар сони. Агар $\gamma = 1$, $r = 1$, $\alpha = \beta$ бўлса, (30) тенгламадан Качанов-Работнов тенгламаси келиб чиқади. Шунга ўхшаш емирилиш ва дарз тарқалишининг кинетик тенгламалари И.А.Биргер, Р.Пэрис, Е.А.Морозов ва бошқалар томонидан таклиф қилинган.

Вариацион тенглама (2) ва (3) муносабатларга кўра такрорий юкланишлардаги стерженлар учун мувозанат дифференциал тенгламалар системаси вектор кўринишида келтирилган. Чегаравий масалани ечиш учун чекли айирмалар услубидан фойдаланилиб, уларнинг аппроксимациялаш жараёнида аниқлиги иккинчи тартибга эга бўлган марказий айирма схемаси қўлланилган. Тегишли чегаравий шартларга эга бўлган чизиқсиз алгебраик тенгламаларни ечиш учун Т.Бўриев услуби асосида қуйидаги рекуррент формула қўлланилган:

$$\vec{V}_i^{(k)} = \alpha_i \vec{V}_{i+1}^{(k)} + \beta_i^{(k)}; \quad i = N-1, \dots, 1 \quad (31)$$

бу ерда $\alpha_i^{(k)} = (\bar{B}_i^{(k)} - \bar{C}_i^{(k)} \alpha_{i-1}^{(k)})^{-1} \bar{A}_i^{(k)}$;

$$\beta_i^{(k)} = (\bar{B}_i^{(k)} - \bar{C}_i^{(k)} \alpha_{i-1}^{(k)})^{-1} (\bar{C}_i^{(k)} \beta_{i-1}^{(k)} - \bar{F}_i^{(k)}) \quad \text{бунда} \quad i = 1, 2, \dots, N-1. \quad (32)$$

Такрорий юкланишлар таъсиридаги юпка деворли стерженларнинг ҳисобини кинетик тенглама (30) эътиборга олган ҳолда амалга ошириш учун C# тилда модификациялаштирилган комплекс дастурдан фойдаланилган.

Емирилиш кинетик тенгламасининг материал ўзгармаслари: $A = 1.2 \cdot 10^{-4}$; $\alpha = \beta = 5$; $\gamma = 0.8$; $\gamma = 1.0$; $\alpha_1 = 0.97$; $r = 2.1$.

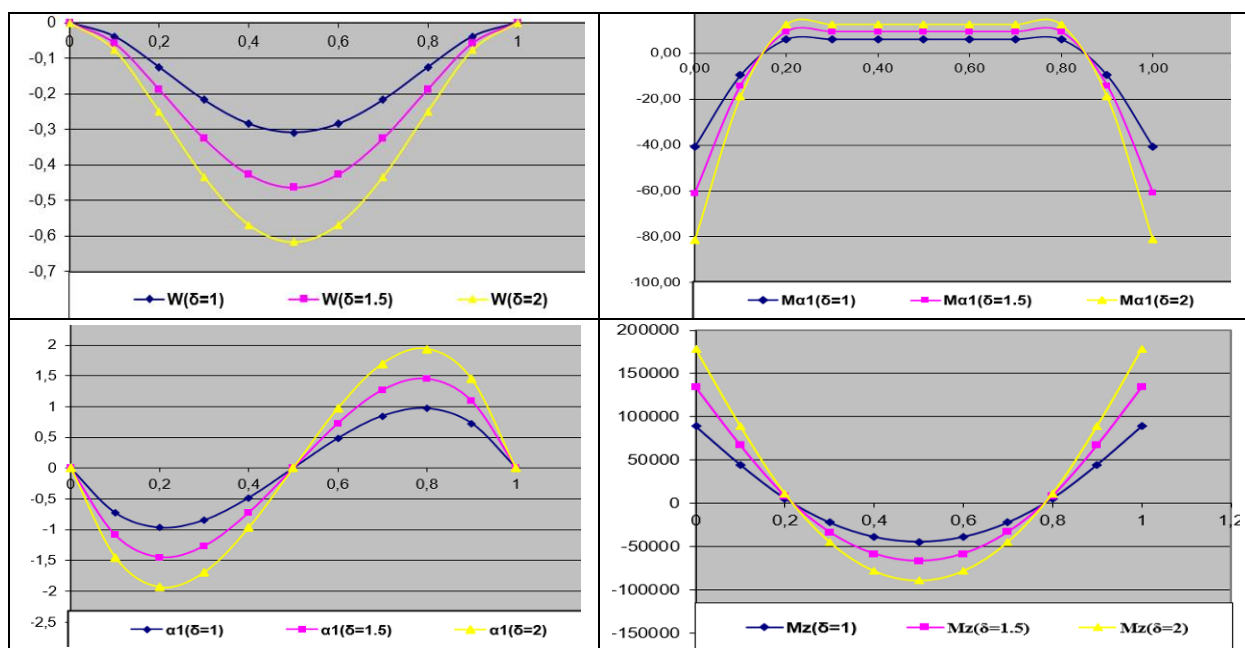
Кўчиш векторининг компонентлари $W^{(k)}, \alpha_1^{(k)}, \beta_1^{(k)}, V^{(k)}, \alpha_2^{(k)}, \beta_2^{(k)}$ ва ички зўриқиш кучлар $Q_1^{(k)}, M_y^{(k)}, M_{a_1}^{(k)}, Q_2^{(k)}, M_z^{(k)}, M_{a_2}^{(k)}$ ҳисобланган.

2-жадвал.

Эластик-пластик стержен учун такрорий юкланишда кўчиш компоненти $W^{(k)}$ ва буралиш бурчаги $\alpha_1^{(k)}$ нинг сонли қийматлари

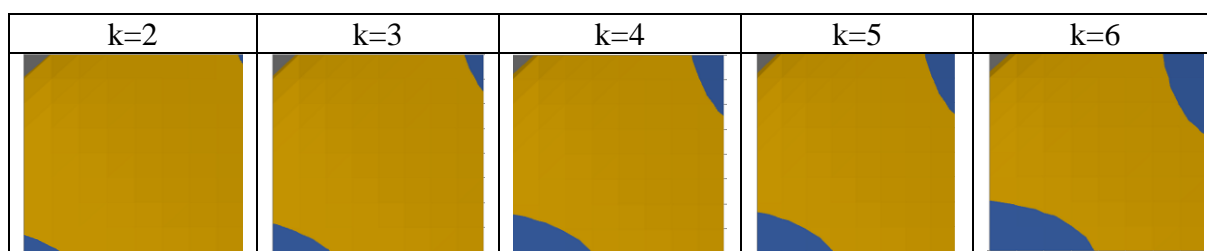
	x	k=1	k=2	k=5	k=6
$W^{(k)}$	0.1	-0.038498	0.038514	-0.038502	0.038515
	0.2	-0.124965	0.125019	-0.124982	0.125024
	0.4	-0.284147	0.284276	-0.284190	0.284286
	0.6	-0.284124	0.284251	-0.284166	0.284262
	0.8	-0.124919	0.124971	-0.124934	0.124976
	0.9	-0.038463	0.038478	-0.038467	0.038480
$\alpha_1^{(k)}$	0.1	-0.724490	0.724800	-0.724583	0.724827
	0.2	-0.965903	0.966339	-0.966050	0.966376
	0.4	-0.482706	0.482927	-0.482782	0.482945
	0.6	0.483426	-0.483655	0.483511	-0.483673
	0.8	0.966394	-0.966825	0.966536	-0.966861
	0.9	0.724772	-0.725073	0.724856	-0.725100

Хусусан, 2-жадвалда эластик-пластик стерженнинг такрорий юкланишлардаги ($k=1,2,3,4,5,6$) кўчиш компонентларининг ($W^{(k)}, \alpha_1^{(k)}$) сонли қийматлари иккиламчи, учламчи ва шу каби, қолдиқ деформацияни эътиборга олган ҳолда келтирилган. Ҳисобий қийматларнинг яқинлашиш характери тадқиқ қилинган.



4-расм. Стержен узунлиги бўйича кўчишлар ($W^{(k)}, \alpha_1^{(k)}$) ва зўриқиш кучларининг ($M_z^{(k)}, M_{a_1}^{(k)}$) ўзгаришлари ($\delta = 1; 1.5; 2$)

5-расмда турли цикларда ($k=2,3,4,5,6$) стерженнинг кўндаланг кесими бўйича пластик соҳаларнинг ўзгариши кўрсатилган.



5-расм. Пластиклик соҳасининг $k = 2,3,4,5,6$ такрорий юкланишлардаги ўзгариши

Шунингдек, доимий зичликка эга бўлган текис тақсимланган куч остидаги ўққа нисбатан симметрик эластик-пластик цилиндрик қобикнинг кучланганлик ҳолати кўрилган. Қўйилган такрорий кучлар: $\delta^{(k)} = \delta q^{(k)}$, $q^{(k)} = (-1)^{k+1}$, $\delta = 2$, $r = 1.2$. Қобик материали- D-16Т.

Сонли ҳисоб натижаларининг таҳлили шуни кўрсатадики, юкланишлар сони ортиши билан пластиклик ва емирилиш функцияларининг қийматлари стерженнинг узунлиги бўйича ўзгариб боради. Бу эса, ўз навбатида, бир жинсиз эластик-пластик стерженнинг хусусиятига таъсирини, шу билан бирга кўчишлар, зўриқиш кучлари ва моментлар қийматларини ўзгартиради. Ҳисоблаш натижалари иккиламчи қолдиқ пластик деформацияни, пластиклик соҳасини аниқлаштириш, емирилиш даражасини цикл бўйича турли материаллар учун (В-96, Д-16Т, ст.ТС) ўзгаришини баҳолаш имконини беради. Мазинг–Москвитин принципига асосан, иккиламчи пластик деформацияни ҳисобга олиш қолдиқ кучланишнинг камайишига олиб келиши кўрсатилган.

ХУЛОСА

«Қобикли конструкцияларнинг турли юкланиш кўринишларида деформацияланишини ҳисоблашни сонли моделлаштириш» мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижалари асосида қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. Лагранж ва Гамильтон-Остроградскийларнинг вариацион принципи асосида қобик конструкциялар деформацияланишининг математик моделлари ишлаб чиқилган. Мазкур моделга кўра ўққа нисбатан симметрик қобик ва доиравий ҳалқа (шпангоут) учун ўринли тенгламалар тизими олинган.

2. Ламе коэффициентлари нисбатининг ўзгарувчанлигини ва В.З.Власов назариясига кўра аниқлаштирилган геометрик муносабатларни эътиборга олган ҳолда цилиндрик ва сферик эластик қобик конструкциялар учун мувозанат (ҳаракат) тенгламалари олинган.

3. Бубнов-Галеркин ва чекли айирмалар усуллари асосида чегаравий ва бошланғич шартларга эга бўлган аниқлаштирилган дифференциал тенгламалар системасини ечишнинг дискрет модели ишлаб чиқилган.

4. Турли юкланишлар таъсиридаги цилиндрик ва сферик қобик конструкцияларни ҳайдаш усулини қўллаган ҳолда ҳисоблаш алгоритмлари ва чегаравий масалалари шакллантирилган. Шакллантирилган чегаравий масалалар ечими қобик конструкцияларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини аниқлашга имкон беради.

5. Қобик конструкцияларнинг деформацияланиш масаласини ечишнинг компьютер реализацияси ишлаб чиқилган. Статик юкланишлар таъсиридаги цилиндрик қобик конструкцияларнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблашнинг дастурий таъминот тизими яратилган. Ишлаб чиқилган программа ва яратилган интерфейс, ҳисоблаш натижаларини жадвал ва график кўринишларда экранга чиқариш, ҳамда кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини таҳлил қилиш имкониятини беради.

6. Цилиндрик қобик-цистерна ўзагини ҳисоблаш алгоритми ва процедураси ишлаб чиқилган. Яриммоментсиз қобик назарияси асосида ишлаб чиқилган ҳисоблаш услуби соддалаштирилган аналитик ечимни куришга, ҳамда ҳисобий миқдорларни–кўчиш, кучланиш ва моментларнинг тақсимланишини таҳлил қилишга имкон беради. Кўрилаётган масалада цистерна ўзаги ички босим таъсирида сезиларли даражада деформацияланиши ва кучланганлиги кўрсатилган. Қиёсий таҳлил мақсадида цистерна ўзагининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати ANSYS дастурини қўллаган ҳолда амалга оширилган.

7. Такрорий–фазовий юкланишлар таъсиридаги юпқа конструкция элементларини–стерженлар ва ўққа нисбатан симметрик цилиндрик қобикнинг ҳолат тенгламаларини эътиборга олган ҳолда ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган, бунда кучланиш интенсивлиги емирилиш ва юкланишлар сонининг функцияси сифатида қаралган. Ҳисоблаш натижалари кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини иккиламчи қолдиқ пластик деформацияни эътиборга ҳолда цикл бўйича турли материалларнинг пухталанишини (В-96, Д-16Т, ст.ТС) баҳолаш имконини беради.

8. Натижалар таҳлили асосида, иккиламчи пластик деформацияни ҳисобга олиш қолдиқ кучланиш камайишига олиб келиши кўрсатилган. Циклик юкланишларни ортиши натижасида пластиклик ва емирилиш соҳасининг ўзгариши, шунингдек пухталанувчан материалларнинг кучланганлик ҳолати чегаравий ҳолатга ўтиши кўрсатилган.

9. Ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритми ва дастурий таъминот “Tashkent metroprojekt” “Ўзоғирсаноатлойиҳа” ва “Қуюв-механика заводи” масъулияти чекланган жамиятлар объектларига лойиҳа ҳисоб ишларини амалга оширишда апробациядан ўтган ва татбиқ қилинган. Илмий тадқиқот натижалари лойиҳа ҳисоб ишлари учун вақт сарфини 1,8 марта тежаш ҳамда ҳисоблаш хатолигини 12-18% гача камайтириш имконини берган.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ НА ОСНОВЕ НАУЧНОГО СОВЕТА
DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ
МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ АН РУз**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

САБИРОВ НИЗАМБАЙ ХАЙИТБАЕВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ
НАГРУЖЕНИЙ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

Ташкент – 2020

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2019.3.PhD/T556.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете. Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.instmech.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научные руководители:	Абдусаттаров Абдусамат Доктор технических наук, профессор Юлдашев Таджимат доктор технических наук, с.н.с
Официальные оппоненты:	Юлдашев Шарафитдин Сайфитдинович доктор технических наук, профессор Нуралиев Фахриддин Муродуллаевич доктор технических наук, доцент
Ведущая организация:	Национальный университет Узбекистана

Защита диссертации состоится « 16 » сентября 2020 года в 14⁰⁰ часов на заседании Разового научного совета на основе Научного совета DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз (Адрес: 100125, г.Ташкент, ул. Дурмон йули, 33. Зал заседаний №2. Тел.: (99871) 262-71-32, (99871) 262-71-52, e-mail: instmech@academy.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Академии наук Республики Узбекистан (регистрационный номер –). Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Зиёлилар, 13.

Автореферат диссертации разослан « 03 » декабря 2020 года.
(реестр Протокола рассылки №1 от « » декабря 2020 года.).



М.М. Мирсаидов
Председатель Разового научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор, академик АН РУз

М.К. Усаров
Ученый секретарь Разового научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., с.н.с.

Р.А. Абиров
Председатель Научного семинара при Разовом научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., с.н.с.

ВВЕДЕНИЕ(аннотация диссертации доктора философии(PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире особое внимание уделяется разработке и совершенствованию методов расчета деформирования упругих оболочечных конструкций, используемых при проектировании различных элементов конструкций и сооружений. В связи с этим повышение прочности, снижение материалоемкости, интенсификация рабочих параметров тонкостенных оболочечных конструкций являются наиболее важными задачами их применения в отраслях транспортного строительства, машиностроения, энергетики. Тонкостенные оболочечные конструкции (покрытия и перекрытия в строительстве, тепловые энергоустановки, газо - и нефтепроводы, сосуды высокого давления, кузова вагонов, котлы цистерн, отделка тоннелей) отличаются существенной спецификой конструктивных форм, технологией изготовления, условиями эксплуатации, физико-механическими свойствами применяемых материалов.

Во всем мире проводятся научные исследования, направленные на развитие и разработку математических моделей деформирования, численных методов и алгоритмов расчета, анализ напряженно-деформированного состояния тонкостенных оболочечных конструкций. В этом направлении важнейшими задачами считаются разработка моделей, методов расчета оболочечных конструкций с улучшенными эксплуатационными характеристиками, а также совершенствование существующих моделей и исследование НДС элементов конструкций в пределах и за пределами упругости при различных видах нагружений.

В республике осуществляется широкомасштабные мероприятия по проектированию тонкостенных конструкций и современных сооружений. В связи с этим разработка новых типов оболочечных конструкций, в частности цилиндрических и сферических оболочечных элементов, с усовершенствованными рабочими характеристиками, модернизация эксплуатируемых моделей обуславливают выполнение предпроектных расчетов с использованием современных численных методов и персональных компьютеров для оценки несущей способности конструкций.

В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы определены такие важные задачи, как «...проектирование и модернизация дорожно-транспортных, инженерно-коммуникационных и социальной инфраструктур, ...внедрение информационно-коммуникационных технологий...»¹. При их решении главными вопросами являются разработка уточненных математических моделей, создание программных средств для расчета оболочечных конструкций (типа цистерны) при различных видах нагружений, анализ влияния геометрических параметров и механических характеристик на НДС конструкции.

¹ Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, изложенных в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениях Президента Республики Узбекистан №ПП-3190 от 9 августа 2017г. «О мерах по совершенствованию проведения научных исследований в области сейсмологии, сейсмостойкости строительства и сейсмологической безопасности населения и территории Республики Узбекистан», №ПП-3682 от 27 апреля 2018г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов» и других нормативно-правовых документов.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Математика, механика и информатика».

Степень изученности проблемы. Научные исследования по моделированию процессов деформирования и методов расчета упругих оболочечных конструкций при различных видах нагрузений проводились такими известными зарубежными учеными, как H.Reissner, E.Meissner, W.Flugge, L.H.Donnell, A.E.Green, W.Zerna, W.T.Koiter, P.M.Nagdi, C.Truesdell, H.Neuber, N.Hoff, A.Libai, A.Love, S.P.Timoshenko, J.C.Simmonds, S.Woinowsky–Krieger. Значительный вклад в исследование влияния на развитие теории и методов расчета оболочечных конструкций в пределах и за пределами упругости внесли А.А.Ильюшин, С.А.Амбарцумян, Н.А.Алфутов, В.В.Болотин, Т.Буриев, В.З.Власов, А.С.Вольмир, Э.И.Григолюк, Я.М.Григоренко, А.П.Гусенков, В.В.Новожилов, А.И.Лурье, В.В.Москвитин, В.И.Мяченков, В.И.Мальцев, Х.М.Муштари, Э.И.Старовойтов, В.К.Кабулов, Х.А.Рахматулин, Т.Р.Рашидов, Т.Ш.Ширинкулов, А.П.Филин и др.

При выполнении расчета несущих элементов тонкостенных конструкций и сооружений за пределами упругости при переменных нагрузениях используется, главным образом, теория малых упругопластических деформаций, сформулированная А.А.Ильюшиным – В.В.Москвитиным. Различные варианты критериев повреждаемости, малоцикловой и длительной прочности предложены И.А.Биргером, В.С.Бондарем, Л.Коффином, С.Мэнсоном, Т.Йокобори, С.В.Серенсенем, Н.А.Махутовым, Г.В.Москвитиным, Г.П.Черепановым, В.Т.Трощенко, А.М.Локощенко и др.

В нашей стране вопросы моделирования и автоматизации решений задач теории упругости, пластичности и сплошных сред впервые были поставлены академиком В.К.Кабуловым и развиты его учениками и последователями Т.Буриевым, К.Ш.Бабамуродовым, Ф.Б.Бадаловым, Б.Курманбаевым, А.А.Халджигитовым, Т.Юлдашевым, Н.Равшановым, А.М.Полатовым, Р.А.Абировым, Ш.А.Назировым, Ф.М.Нуралиевым, Б.А.Худаяровым, Ш.А.Анаровой, М.М.Расулмухаммедовым и др. Вопросы разработки, реализация на ЭВМ, построение алгоритмической системы расчета тонкостенных конструкций в пределах и за пределами упругости при

переменных нагрузениях и разгрузениях в текущих величинах рассмотрены академиком Т.Буриевым.

Различные аспекты проблемы деформирования твердого тела и тонкостенных конструкций при статическом и динамическом нагружении, вопросы разработки моделей и численных расчетов, а также взаимодействия конструкций с грунтом были исследованы Т.Р.Рашидовым, М.М.Мирсаидовым, Г.Х.Хожметовым, Б.Мардоновым, К.С.Султановым, Х.Х.Худайназаровым, Б.Х.Хужаёровым, Т.М.Мавлановым, К.Исмойиловым, Б.Э. Хусановым, И.С.Сафаровым, А.Б.Ахмедовым, Р.А.Абдукаримовым, И.Мирзаевым, Р.Ш.Индиаминовым, М.К.Усаровым, Х.Сагдиевым, А.Х.Маткаримовым и др. В последние годы создаются новые виды оболочечных конструкций- вагонов-цистерн. В связи с этим разработка новых типов составных оболочечных конструкций – котла-цистерны с улучшенными эксплуатацион-ными характеристиками, а также совершенствование существующих моделей обуславливают необходимость выполнения предпроектных расчетов с использованием современных численных методов и персональных компьютеров для анализа несущей способности цистерны. Разработкой методов расчета прочности и надежности движущихся элементов поезда, в частности вагонов-цистерн, занимались С.В.Вершинский, И.Г.Морчиладзе, В.Н.Котуранов, В.В.Лукин, Л.А. Шадур, И.И.Челноков, Ш.С. Файзибаев, Я.Рузметов и др.

Проведенный обзор и анализ методов расчета элементов оболочечных конструкций и тонкостенных стержней при различных видах нагружений с учетом повреждаемости и малоцикловой прочности недостаточно исследованы. Поэтому возникает необходимость в разработке эффективных методов и алгоритмов расчета, создании программных средств для моделирования процессов деформирования элементов тонкостенных конструкций с учетом упругих и упругопластических свойств материалов при исходных и циклических нагружениях.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта №А14-010 «Разработка эффективных методов исследования малоцикловой прочности и динамики составных оболочечных конструкций типа цистерны при различных видах нагружений» прикладного гранта (2015–2017) и Ф4-019 «Разработка научных основ теории и методов расчета вязкоупругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях и конечных деформациях» фундаментального гранта (2017–2020) .

Целью исследования являются разработка математических моделей деформирования тонкостенных оболочечных конструкций при статическом и динамическом нагружениях, а также алгоритмов расчета и программных средств для анализа НДС элементов оболочечных конструкций и стержней при различных видах граничных и начальных условий.

Задачи исследования:

сформировать расчетную схему, построить геометрические и физические соотношения, составить уравнение равновесия осесимметричных оболочечных конструкций;

составить вариационное уравнение равновесия и движения осесимметричных оболочечных конструкций шпангоутов;

разработать расчетную модель деформирования цилиндрической и сферической оболочечных конструкций;

усовершенствовать вычислительные алгоритмы расчета элементов оболочечных конструкций – цилиндрических и сферических оболочек на основе комбинированного метода;

разработать методику расчета цилиндрической оболочки – котла-цистерны по полубезмоментной теории и исследовать кинетику НДС;

исследовать НДС тонкостенных стержней при пространственно-переменном нагружении с учетом повреждаемости;

исследовать НДС цилиндрической оболочки с применением комплекса программ ANSYS.

Объектом исследования являются оболочечные конструкции, котлы-цистерны и тонкостенные стержни при различных видах нагружений.

Предмет исследования составляют модели деформирования, алгоритмы расчета, исследования НДС элементов оболочечных конструкций.

Методы исследования. В процессе исследования применены методы теории упругости и пластичности, теории оболочек, вариационные принципы, численные методы, разностные схемы и технологии программирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

на основе вариационного принципа Гамильтона– Остроградского создана модель деформирования оболочечных конструкций и шпангоутов;

разработан уточненная расчетная модель деформирования цилиндрических и сферических оболочечных конструкций;

разработан методика решения краевой задачи для цилиндрической и сферической оболочек при статическом и динамическом нагружениях;

разработан компьютерная реализация расчета цилиндрических оболочечных конструкций;

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны математические модели деформирования подкрепленных оболочечных конструкций со шпангоутами при различных видах нагружений;

разработана методика расчета упругих оболочечных конструкций–цилиндрических и сферических оболочек;

создан комплекс программ, позволяющий алгоритмизировать процессы решения краевых задач и анализировать кинетику НДС оболочечных конструкций при различных видах нагружений (№ DGU 05551);

разработана программа расчета несущих элементов тонкостенных конструкций при переменных нагрузениях с учетом накопления повреждений (№ DGU 08226);

исследована НДС котла-цистерны с применением программы ANSYS.

Достоверность результатов исследования обосновывается корректностью постановки задачи на основе вариационного принципа Лагранжа и Гамильтона– Остроградского, использованием обоснованных численных методов и теории оболочек, а также путем сравнения полученных решений с решениями других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в том, что предложена методика математического моделирования ряда новых задач в области линейных и нелинейных процессов деформирования оболочечных конструкций, созданы универсальные и эффективные алгоритмы на основе численно-аналитических методов, а также разработаны программные средства для расчета напряженно-деформированного состояния элементов тонкостенных конструкций.

Практическая значимость результатов исследования состоит в том, что разработанные математические модели, алгоритмы и программный комплекс могут быть использованы в проектных организациях и научно-исследовательских институтах.

Внедрение результатов исследования. На основе разработанной математической модели деформирования оболочечных конструкций при статическом и динамическом нагружении с учетом граничных и начальных условий и используя результаты вычислительных алгоритмов и программных средств для анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкций:

разработанные вычислительные алгоритмы, построенные дискретные схемы на основе метода конечных разностей и созданный комплекс прикладных программ внедрены на объектах предприятий ООО «Tashkent metropoject» (Справка о внедрении Министерства строительства Республики Узбекистан от 9 сентября 2019г. №6576/09–07). В результате, программное обеспечение позволило сократить срок вычислительного процесса в 2 раза за счет высокой точности и эффективности разработанных методов и повышения результативности проектных работ на 12–18%;

разработанные математические модели деформирования цилиндрических оболочечных конструкций при статических нагружениях, вычислительные алгоритмы с использованием метода конечных разностей и комплекс прикладных программ внедрены на объектах АО “Узогирсаноатлойиха” (Справка о внедрении Министерства строительства Республики Узбекистан от 9 сентября 2019г. №6576/09–07). В результате программное обеспечение позволило сократить срок вычислительного процесса в 1.5 раза за счет высокой точности и эффективности разработанных методов, а также повышения результативности проектных работ на 10–15%;

построенные дискретные модели на основе комбинированного метода и созданный комплекс программ внедрены на объектах ДП “Литейно-механический завод” (Акт, ДП “Литейно–механический завод” от 13 мая 2019г.). Разработанная программа позволила сократить срок вычислительного процесса в 1.8 раза, повысить точность и эффективность проектных работ на 15–20%;

внедрение научных результатов в практику проектирования позволяет сократить цикл поиска рациональных и технических решений, уменьшить материалоемкость конструкций, снизить объем и затраты на проведение экспериментальных исследований, повысить точность расчетов на НДС и снизить повреждаемость тонкостенных конструкций.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 3 международных и 14 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 38 научных работ. Из них 1 монография, 19 научных статей, в том числе 3 – в зарубежных и 16 – в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации доктора философии (PhD), а также получено 2 свидетельства о регистрации программных средств для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, выявлены объект и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложены научная новизна и практические результаты исследований, приведены сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации – **“Математические модели деформирования осесимметричных оболочечных конструкций”** – дан приведен обзор исследований по изученности проблемы математического моделирования деформирования тонкостенных оболочечных конструкций.

Во второй части рассмотрена расчетная схема, геометрические и физические соотношения для элементов осесимметричных оболочечных конструкций. При составлении расчетной схемы, следуя теории Мяченкова – Мальцева, оболочечная конструкция расчленяется на оболочки вращения и кругового шпангоута. Принимается, что для оболочечных элементов справедливы гипотезы Кирхгофа–Лява. Поперечные сечения шпангоутов рассматриваются по схеме кругового кольца.

При описании физических свойств оболочечных элементов используются обобщенный закон Гука. Для оболочечных и кольцевых элементов приведены связывающие соотношения между деформациями и перемещениями. Для вывода уравнений равновесия и движения используются вариационные принципы. Получены системы дифференциальных уравнений равновесия для оболочечного и кольцевого элемента с соответствующими граничными условиями.

Деформации оболочечного элемента, параллельного срединной поверхности, определяются по формуле

$$\varepsilon_{11}^z = \varepsilon_{11} + z\chi_{11}; \quad \varepsilon_{22}^z = \varepsilon_{22} + z\chi_{22}; \quad \varepsilon_{12}^z = \varepsilon_{12} + z\chi_{12}. \quad (1)$$

Для получения уравнения движения элементов оболочечных конструкций воспользовались уравнением Гамильтона – Остроградского

$$\delta \int_t (\delta T - \delta \Pi + \delta A) dt = 0. \quad (2)$$

Вариации кинетической, потенциальной энергии и работа внешних сил определялись следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \delta \Pi &= \int_V (\sigma_{11} \delta \varepsilon_{11}^z + \sigma_{12} \delta \varepsilon_{12}^z + \sigma_{22} \delta \varepsilon_{22}^z) dV; \\ \delta A &= \int_V (p_1 \delta U_1 + p_2 \delta U_2 + p_3 \delta U_3) dV + \int_S (q_1 \delta U_1 + q_2 \delta U_2 + q_3 \delta U_3) dS + \\ &+ \int_{S_1} (f_1 \delta U_1 + f_2 \delta U_2 + f_3 \delta U_3) dS_1 \Big|_{\alpha_1} + \int_{S_2} (\varphi_1 \delta U_1 + \varphi_2 \delta U_2 + \varphi_3 \delta U_3) dS_2 \Big|_{\alpha_2}; \\ \delta T &= \iiint_V \left[\rho \frac{\partial u_1}{\partial t} \delta \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_2}{\partial t} \delta \frac{\partial u_2}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_3}{\partial t} \delta \frac{\partial u_3}{\partial t} \right] dv dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Используя геометрические соотношения и закон Гука, а также сформированные соотношений (3) и подставляя их в вариационный принцип (2), получим уравнения равновесия для оболочечных элементов.

Также на основе вариационного принципа Гамильтона–Остроградского разработаны математические модели нелинейного деформирования оболочечных конструкций. Следуя Х.М.Муштари, изгиб оболочек считается средним и для этого случая используются приближенные формулы по определению компонентов деформации и кривизны через конечные смещения. В результате получено вариационное уравнение движения для оболочечных элементов.

Во второй главе диссертации – **«Формирование математической модели и алгоритмы расчета цилиндрических оболочечных конструкций»** – на основе моментной теории оболочек и вариационного принципа разработаны уточненные расчетные модели деформирования цилиндрических оболочечных конструкций. Получена система дифференциальных уравнений с граничными и начальными условиями. Для решения краевых задач применены численные методы.

Приведены геометрические и физические соотношения для цилиндрической оболочки. Предположено, что срединная поверхность

оболочки отнесена к криволинейной ортогональной системе координат $\alpha = z/L$, $\beta = s/R$. Следуя теории оболочек В.З.Власова, перемещения произвольной точки тела оболочки, отстающей от срединной поверхности по нормали на расстояние γ , представим в виде

$$U_\alpha = (1 + k_1\gamma)U - \frac{\gamma}{A} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha}, \quad U_\beta = (1 + k_2\gamma)V - \frac{\gamma}{B} \cdot \frac{\partial W}{\partial \beta}, \quad U_\gamma = W(\alpha, \beta). \quad (4)$$

С учетом выражений перемещений (4), коэффициентов Ламе и их отношений напишем в виде рядов по переменной γ с точностью $(\gamma k_i)^2$

$$\frac{1}{H_2} = \frac{1}{B}(1 - k_2\gamma + k_2^2\gamma^2); \quad \frac{H_2}{H_1} = \frac{B}{A}(1 + k_2\gamma); \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{A}{B}(1 - k_2\gamma + k_2^2\gamma^2);$$

для определения деформаций получены следующие уточненные формулы:

$$e_{\alpha\alpha} = \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \alpha} - \frac{\gamma}{R^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2}, \quad e_{\beta\beta} = \frac{\partial V}{R \partial \beta} - (\gamma - k_2\gamma^2) \frac{\partial^2 W}{R^2 \partial \beta^2} + (1 - k_2\gamma + k_2^2\gamma^2) k_2 W;$$

$$e_{\alpha\beta} = (1 - k_2\gamma + k_2^2\gamma^2) \frac{\partial U}{B \partial \beta} - (\gamma - k_2\gamma^2) \frac{\partial^2 W}{AB \partial \alpha \partial \beta} + (1 + k_2\gamma) \frac{\partial V}{A \partial \alpha} - \frac{\gamma}{AB} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha \partial \beta}; \quad (5)$$

для объемного расширения:

$$\Delta = \frac{\partial U}{A \partial \alpha} - \frac{\gamma}{A^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial V}{B \partial \beta} - (\gamma - k_2\gamma^2) \frac{\partial^2 W}{B^2 \partial \beta^2} + (1 - k_2\gamma + k_2^2\gamma^2) k_2 W. \quad (6)$$

Считается, что цилиндрическая оболочка деформируется в пределах упругости. Тогда компоненты напряжений определяются по обобщенному закону Гука

$$\sigma_\alpha = (\lambda + 2\mu)\Delta - 2\mu(e_{\beta\beta} + e_{\gamma\gamma}); \quad \sigma_\beta = (\lambda + 2\mu)\Delta - 2\mu(e_{\alpha\alpha} + e_{\gamma\gamma}); \quad \tau_{\alpha\beta} = \mu e_{\alpha\beta}. \quad (7)$$

Для получения уравнения движения цилиндрических оболочечных конструкций воспользовались вариационным принципом Гамильтона – Остроградского (2) – (3). Учитывая выражения перемещений (4), деформаций (5) – (6), обобщенного закона Гука (7), а также выполняя интегрирование по частям, вводя некоторые обозначения из вариационного уравнения, получили системы дифференциальных уравнений движения с граничными и начальными условиями.

Для решения краевых задач применен метод Бубнова – Галеркина:

$$U = \sum_n U_n(\alpha, t) \cos \frac{n\pi\beta}{\beta_1}, \quad V = \sum_n V_n(\alpha, t) \sin \frac{n\pi\beta}{\beta_1}, \quad W = \sum_n W_n(\alpha, t) \cos \frac{n\pi\beta}{\beta_1}. \quad (8)$$

После некоторых преобразований получена уточненная система дифференциальных уравнений для цилиндрических оболочек в следующем виде:

$$-\alpha_1^{(i)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial t^2} + \alpha_2^{(i)} \frac{\partial^4 W_n}{\partial t^2 \partial \alpha^2} - \alpha_3^{(i)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial t^2} - \alpha_4^{(i)} \frac{\partial^4 W_n}{\partial \alpha^4} + \alpha_5^{(i)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial \alpha^2} - \alpha_6^{(i)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} - \alpha_7^{(i)} W_n - \alpha_8^{(i)} V_n + Z_n = 0;$$

$$\begin{aligned}
& -\alpha_1^{(2)} \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} + \alpha_2^{(2)} \frac{\partial^2 U_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_4^{(2)} \frac{\partial V_n}{\partial \alpha} + \alpha_3^{(2)} \frac{\partial W_n}{\partial \alpha} - \alpha_5^{(2)} U_n + X_n = 0; \\
& -\alpha_2^{(3)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial t^2} + \alpha_1^{(3)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial t^2} - \alpha_4^{(3)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} + \alpha_3^{(3)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_5^{(3)} W_n - \alpha_6^{(3)} V_n + Y_n = 0.
\end{aligned} \tag{9}$$

граничные условия:

$$\begin{aligned}
& \left[-(\lambda + 2\mu) \cdot h \frac{\partial U}{R \partial \alpha} - \lambda h \frac{\partial V}{R \partial \beta} - \lambda k_2 \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{R^2 \partial \beta^2} - \lambda \cdot \left(h + k_2 \frac{h^3}{12} \right) k_2 W + N(\varphi_1) \right] \delta U \Big|_{\alpha} = 0; \\
& \left[-\mu \left(h + k_2 \frac{h^3}{12} \right) \frac{\partial U}{R \partial \beta} - \mu h \frac{\partial V}{R \partial \alpha} - \mu k_2 \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{R^2 \partial \alpha \partial \beta} + N(\varphi_2) \right] \delta V \Big|_{\alpha} = 0; \\
& \left[(\lambda + 2\mu) \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 W}{R^3 \partial \alpha^3} + \lambda \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 W}{R^3 \partial \alpha \partial \beta^2} + \lambda k_2 \frac{h^3}{12} \frac{\partial W}{R \partial \alpha} + 2\mu k_2 \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 U}{R^2 \partial \beta^2} - \right. \\
& \left. - \mu k_2 \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 V}{R^2 \partial \alpha \partial \beta} + 4\mu \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 W}{R^3 \partial \alpha \partial \beta^2} + Q(\varphi_3) + \frac{\partial M(\varphi_2)}{R \partial \beta} \right] \delta W \Big|_{\alpha} = 0; \\
& \left[-(\lambda + 2\mu) \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{R^2 \partial \alpha^2} - \lambda \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{R^2 \partial \beta^2} - \lambda k_2 \frac{h^3}{12} W - M(\varphi_1) \right] \delta \frac{\partial W}{R \partial \alpha} \Big|_{\alpha} = 0.
\end{aligned} \tag{10}$$

начальные условия:

$$\begin{aligned}
& \rho h \frac{\partial U}{\partial t} \delta U \Big|_t = 0; \quad \left[\rho \left(h + k_2 \frac{h^3}{12} \right) \frac{\partial V}{\partial t} - \rho k_2 \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 W}{\partial t R \partial \beta} \right] \delta V \Big|_t = 0; \\
& \left[\rho h \frac{\partial W}{\partial t} - \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 W}{\partial t R^2 \partial \alpha^2} + \rho k_2 \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 V}{\partial t R \partial \beta} - \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^3 W}{\partial t R^2 \partial \beta^2} \right] \delta W \Big|_t = 0.
\end{aligned} \tag{11}$$

Систему дифференциальных уравнений (9) можно записать в векторной форме

$$A_1 \ddot{U}_n + A_2 \ddot{U}_n'' + A_3 U_n^{IV} + A_4 U_n'' + A_5 U_n' + A_6 U_n + F_n = 0. \tag{12}$$

где $U_k = (W_k, U_k, V_k)^T$, $F_k = (Z_k, X_k, Y_k)^T$; A_i – матрица третьего порядка.

Для решения краевых задач (12), (10) и (11) применяется метод конечных разностей второго порядка точности. На основе использования центрально-разностных формул получена следующая система алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
& B_n U_{n,i-1}^{k+1} + C_n U_{n,i}^{k+1} + B_n U_{n,i+1}^{k+1} + \bar{A}_n U_{n,i+1}^{k+1} + \bar{B}_n U_{n,i-1}^k + \bar{C}_n U_{n,i}^k + \bar{D}_n U_{n,i+1}^k + \bar{A}_n U_{n,i+2}^k + B_n U_{n,i-1}^{k-1} + \\
& + C_n U_{n,i}^{k-1} + B_n U_{n,i+1}^{k-1} + \tau^2 F_{n,i}^k = 0.
\end{aligned} \tag{13}$$

После аппроксимации начальное условие (13) примет следующий вид:

$$\left[\bar{M}_1 U_{n,i-1}^{k+1} + \bar{M}_2 U_{n,i}^{k+1} + \bar{M}_3 U_{n,i+1}^{k+1} - \bar{M}_1 U_{n,i+1}^{k+1} - \bar{M}_1 U_{n,i-1}^{k-1} - \bar{M}_2 U_{n,i}^{k-1} - \bar{M}_3 U_{n,i+1}^{k-1} \right] \cdot t_0 h \delta U_{n,i+1}^{k-1} = 0. \tag{14}$$

Решение разностной краевой задачи осуществляется методом прогонки. Предполагается, что перемещения и их скорости в начальный момент

времени заданы. Считается, что цилиндрическая оболочка закреплена при $\alpha=0$ и $\alpha=1$. В векторном виде граничные условия выразятся следующим образом:

$$U_{n,0}^j = 0; A'U_{n,-1}^j = A'U_{n,1}^j; U_{n,N}^j = 0; A'U_{n,N+1}^j = A'U_{n,N-1}^j. \quad (15)$$

Систему разностных уравнений (13) перепишем с учетом граничных условий (15) при $i=1,2,\dots,N-1$, в результате система примет вид

$$B_n U_{n,i-1}^{k+1} + C_n U_{n,i}^{k+1} + B_n U_{n,i+1}^{k+1} = b_{n,j}, \quad (16)$$

где $b_{n,i} = \tau^2 F_{n,i}^k - (\bar{A}_n U_{n,i-2}^k + \bar{B}_n U_{n,i-1}^k + \bar{C}_n U_{n,i}^k + \bar{D}_n U_{n,i+1}^k + \bar{A}_n U_{n,i+2}^k + B_n U_{n,i-1}^{k-1} + C_n U_{n,i}^{k-1} + B_n U_{n,i+1}^{k-1})$.

Из уравнения (16) можно вывести решение для i -го уравнения

$$U_{n,i}^{K+1} = f_i - H_i U_{n,i+1}^{K+i}, \quad (17)$$

где $f_i = (C_n - B_n H_{i-1})^{-1} (b_{n,i} - B_n f_{i+1})$, $H_i = (C_n - B_n H_{i-1})^{-1} B_n$.

При обратной прогонке определяются остальные значения вектора перемещений $U_{n,i}^k$.

В третьей главе диссертации – «**Формирование математической модели сферических оболочечных конструкций**» – используя принцип Гамильтона – Остроградского, получим вариационное уравнение движения (равновесия) сферических оболочечных конструкций в усилиях и перемещениях. На основе применения метода Бубнова–Галеркина разработана система дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими граничными и начальными условиями.

В данной задаче компоненты перемещений представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_\alpha &= (1+k_1\gamma)U - \frac{\gamma}{A} \frac{\partial W}{\partial \alpha} = (1+k_1\gamma)U - \gamma \frac{\partial W}{R\partial \alpha}; \\ U_\beta &= (1+k_2\gamma)V - \frac{\gamma}{B} \frac{\partial W}{\partial \beta} = (1+k_2\gamma)V - \gamma \frac{\partial W}{R \sin \alpha \partial \beta}; \quad U_\gamma = W(\alpha, \beta). \end{aligned} \quad (18)$$

Деформации определены по следующим формулам (с точностью $(\gamma k_i)^2$):

$$\begin{aligned} e_{\alpha\beta} &= \frac{\partial u}{R \sin \alpha \partial \beta} + \frac{\partial v}{R \partial \alpha} - 2(\gamma - k_2\gamma^2) \frac{\partial^2 w}{R^2 \sin \alpha \partial \alpha \partial \beta} - \frac{\cos \alpha}{R \sin \alpha} V + (\gamma - k_2\gamma^2) \frac{2 \cos \alpha}{R^2 \sin \alpha} \frac{\partial w}{\partial \beta}; \\ e_{\beta\beta} &= \frac{\partial v}{R \sin \alpha \partial \beta} - (\gamma - k_2\gamma^2) \frac{\partial^2 w}{R^2 \sin^2 \alpha \partial \beta^2} + \frac{\cos \alpha}{R \sin \alpha} U - (\gamma - k_2\gamma^2) \frac{\cos \alpha}{R^2 \sin \alpha} \frac{\partial w}{\partial \alpha} + k_1 W (1 - k_1\gamma + k_1^2\gamma^2); \\ e_{\alpha\alpha} &= \frac{\partial u}{R \partial \alpha} - (\gamma - k_1\gamma^2) \frac{\partial^2 w}{R^2 \partial \alpha^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

Используя вариационный принцип Гамильтона–Остроградского и метод Бубнова–Галеркина для сферических оболочечных конструкций получили следующую уточненную систему дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями:

$$-\alpha_1^{(3)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial t^2} - \alpha_4^{(3)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial t^2} - \alpha_2^{(3)} \frac{\partial^3 U_n}{\partial t^2 \partial \alpha} + \alpha_8^{(3)} \frac{\partial^4 W_n}{\partial t^2 \partial \alpha^2} - \alpha_6^{(3)} \frac{\partial^4 W_n}{\partial \alpha^4} - \alpha_5^{(3)} \frac{\partial^3 U_n}{\partial \alpha^3} - \alpha_9^{(3)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \alpha^2} +$$

$$\begin{aligned}
& + \alpha_7^{(3)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_{11}^{(3)} \frac{\partial W_n}{\partial \alpha} + \alpha_{14}^{(3)} \frac{\partial V_n}{\partial \alpha} + \alpha_{13}^{(3)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} - \alpha_8^{(3)} W_n - \alpha_{12}^{(3)} U_n - \alpha_{10}^{(3)} V_n + Z_n = 0; \\
& - \alpha_1^{(1)} \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} + \alpha_3^{(1)} \frac{\partial^3 W_n}{\partial t^2 \partial \alpha} + \alpha_4^{(1)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \alpha^2} - \alpha_8^{(1)} \frac{\partial^3 W_n}{\partial \alpha^3} + \alpha_2^{(1)} \frac{\partial^2 U_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_5^{(1)} \frac{\partial W_n}{\partial \alpha} + \alpha_9^{(1)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} + \alpha_6^{(1)} \frac{\partial V_n}{\partial \alpha} + \\
& + \alpha_8^{(1)} W_n - \alpha_{10}^{(1)} U_n - \alpha_7^{(1)} V_n + X_n = 0; \\
& - \alpha_2^{(2)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial t^2} - \alpha_1^{(2)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial t^2} - \alpha_8^{(2)} \frac{\partial^2 W_n}{\partial \alpha^2} + \alpha_9^{(2)} \frac{\partial^2 V_n}{\partial \alpha^2} - \alpha_5^{(2)} \frac{\partial W_n}{\partial \alpha} - \alpha_7^{(2)} \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} - \alpha_{10}^{(2)} \frac{\partial V_n}{\partial \alpha} + \\
& + \alpha_4^{(2)} W_n - \alpha_6^{(2)} U_n - \alpha_3^{(2)} V_n + Y_n = 0.
\end{aligned} \tag{20}$$

Представим данную систему и начальные условия в векторном виде:

$$A_1 \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} + A_2 \frac{\partial^4 U_n}{\partial t^2 \partial \alpha^2} + A_3 \frac{\partial^3 U_n}{\partial t^2 \partial \alpha} + A_4 \frac{\partial^4 U_n}{\partial \alpha^4} + A_5 \frac{\partial^3 U_n}{\partial \alpha^3} + A_6 \frac{\partial^2 U_n}{\partial \alpha^2} + A_7 \frac{\partial U_n}{\partial \alpha} + A_8 U_n + EF_n = 0; \tag{21}$$

$$\left[B_1 \frac{\partial U_n}{\partial t} + B_2 \frac{\partial^2 U_n}{\partial t \partial \alpha} + B_3 \frac{\partial^3 U_n}{\partial t \partial \alpha^2} \right] h \delta U_n|_t = 0. \tag{22}$$

В частности, при статическом нагружении из (21) имеем

$$A_4 U^{IV} + A_5 U^{III} + A_6 U^{II} + A_7 U^I + A_8 U + EF_n = 0. \tag{23}$$

Для решения краевых задач (21), (20) и (22) применен метод конечных разностей второго порядка точности, в результате чего получена система алгебраических уравнений типа (16). Показан ход их решения с применением метода прогонки.

В четвертой главе диссертации – «**Численный алгоритм расчета и исследование НДС тонкостенных конструкций при различных видах нагружений**» – рассматривается моделирование решения задачи деформирования оболочечной конструкции, разработана компьютерная реализация расчета, описаны структуры программного комплекса и инструкция к использованию интерфейса, приведены результаты исследований НДС цилиндрической оболочки. Проведен также расчет котла-цистерны по полубезмоментной теории В.З.Власова.

В первом разделе разработаны комплексная программа и компьютерная реализация решения задач цилиндрической оболочки.

Созданный комплекс программ (C#) состоит из нескольких классов. Класс – это ключевое слово в объектно-ориентированном программировании (ООП). В ООП класс – это основной элемент, в рамках которого осуществляется конструирование программ. Класс содержит в себе данные и код, который управляет этими данными. Конструктор класса – это специальный метод, который вызывается при создании нового объекта и используется для инициализации полей класса значениями, а также для начальных вычислений, если они необходимы.

Опишем основы класса el, который был разработан вариационным и конечно-разностным методами.

Организационные методы (ОМ): $\text{double}[] a(\text{int } i)$, $\text{double}[] b(\text{int } i)$, $\text{double}[] c(\text{int } i)$, $\text{double}[] c(\text{int } i)$. Каждый метод имеет 16 значений и в зависимости от индекса i коэффициенты получают новое значение.

Методы заполнения коэффициентов основного уравнения (МЗКОУ): $\text{double}[,] A_-(\text{int } t)$, $\text{double}[,] B_-(\text{int } t)$, $\text{double}[,] C_-(\text{int } t)$, $\text{double}[,] D_-(\text{int } t)$, $\text{double}[,] E_-(\text{int } t)$. Указанные методы в зависимости от значения t выдают двумерный массив 3×3 .

Методы коэффициентов конечных разностей (МККР): $\text{double}[,] Ak(\text{int } k)$, $\text{double}[,] Bk(\text{int } k)$, $\text{double}[,] Ck(\text{int } k)$, $\text{double}[,] Dk(\text{int } k)$, $\text{double}[,] Ek(\text{int } k)$.

После применения методы конечных разностей в зависимости от значения k выдают двумерный массив 3×3 .

Метод решения уравнений конечно-разностной системы (МРУКРС) – метод `pragonki()`. После применения методов получаем значение вектора перемещений. На основе значений перемещений вычисляются векторы усилий в каждом узле конечных разностей.

Комплекс программ работает в диалоговом режиме. Созданный интерфейс предполагает как вывод результатов расчета в виде таблиц и графиков, так и запись их в индивидуальные файлы для дальнейшего их рассмотрения и анализа.

В качестве примера произведен расчет цилиндрической оболочки, закрепленной с обеих сторон ($\alpha = 0$ и $\alpha = 1$). Полученные результаты представлены в виде графиков (рис.1), а также показан характер распределения расчетных величин при различных узлах сетки N . Анализируя сходимости расчетных величин перемещений W , U , а также изгибающих моментов, отметим, что при практических расчетах можно взять число узлов $N=40$ (см.рис.1).

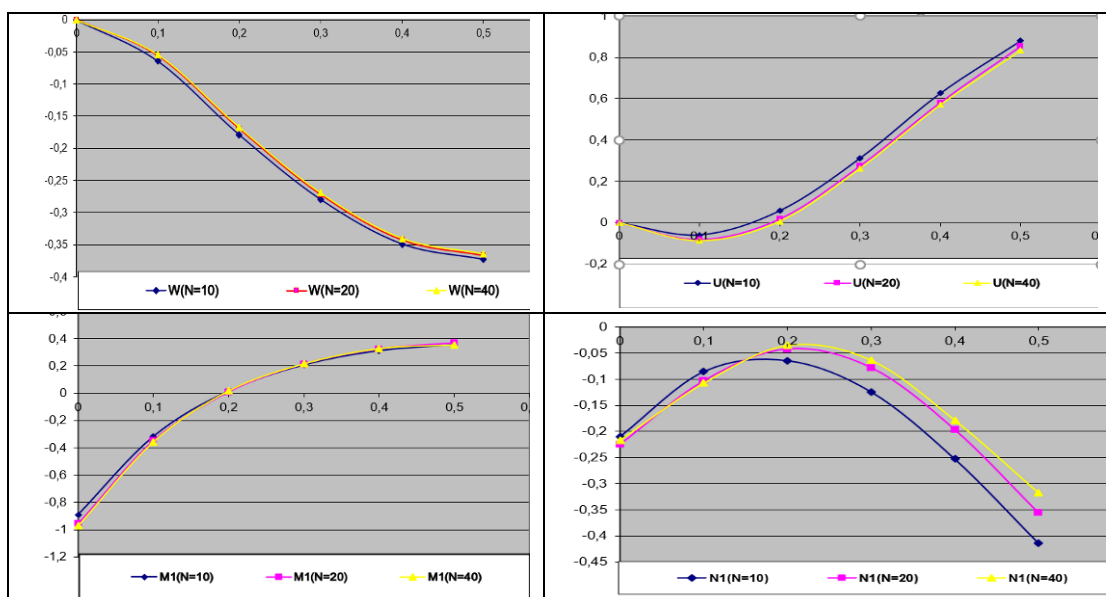


Рис.1. Характер изменения расчетных величин: перемещений W , U и усилий M_1 , N_1 по длине оболочки при различных узлах сетки

Для анализа НДС цилиндрических оболочечных конструкций – котла цистерны использована, в частности, полубезмоментная теория В.З.Власова. Решение задачи представляется в виде ряда

$$V = \sum_{n=2}^{\infty} V_n(\alpha) \sin n\beta, \quad W_n(\alpha) = \sum_{n=2}^{\infty} V_n(\alpha) n \cos n\beta, \quad U_n(\beta) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\partial V_n(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{n} \cos n\beta. \quad (24)$$

После некоторых преобразований задачи сводятся к бесконечной системе однородных независимых дифференциальных уравнений относительно $V_n(\alpha)$.

Рассмотрена процедура расчета цилиндрической оболочки, усиленной в опорных сечениях $z=0$ и $z=l$ жесткими кольцами.

Считается, что оболочка заполнена до некоторого уровня H жидкостью, создающей нормальные давления $p_n = p_n(s)$ на её стенки. Давление жидкости P_n определяется, следуя Вершинскому по формуле

$$p_n = -\tilde{\gamma}R(\cos \beta - \cos \beta_0), \quad (25)$$

где $\tilde{\gamma}$ – объемный вес жидкости; β_0 – центральный угол, характеризующий степень наполнения оболочки.

В табл.1 приведены численные результаты расчета цилиндрической оболочки–котла цистерны (для сечения $z=l/2$) при следующих исходных данных: $R=150$ см; $l=1120$ см; $h=0.6$ см; $\beta_0=33^\circ$; $\tilde{\gamma}=0.001$ кг/см² для различных β .

Таблица 1

Численные результаты расчета цилиндрической оболочки – котла- цистерны

	β	$U(z,s) \cdot 10^2$	$V(z,s)$	$W(z,s)$	$M(z,s)$	$\sigma(z,s)$
n=2	0	0.41391	0	-0.06221	-0.29862	36.74160
	$\pi/6$	0.20680	-0.02695	-0.03108	-0.14920	18.35741
	$\pi/3$	-0.20726	-0.02693	0.03115	0.14953	-18.39760
	$\pi/2$	-0.41391	0.00039	0.06221	0.29863	-36.74162
	$2\pi/3$	-0.20635	0.02697	0.03102	0.14888	-18.31710
	$5\pi/6$	0.20771	0.02691	-0.03122	-0.14986	18.43781
	π	0.41391	-0.00079	-0.06221	-0.29862	36.74152
n=3	0	0.64392	0	-0.21777	-2.78742	57.15900
	$\pi/6$	-0.00041	-0.07259	0.00014	0.00176	-0.03614
	$\pi/3$	-0.64392	0.00092	0.21777	2.78742	-57.15901
	$\pi/2$	0.00012	0.07259	-0.00042	-0.00529	0.10842
	$2\pi/3$	0.64392	-0.00018	-0.21777	-2.78741	57.15880
	$5\pi/6$	-1.00804	-0.07259	0.00069	0.00881	-0.18070
	π	-0.64392	0.00028	0.21777	2.78740	-57.15860

На рис.2 представлены в графическом виде полученные результаты цилиндрической оболочки–котла цистерны

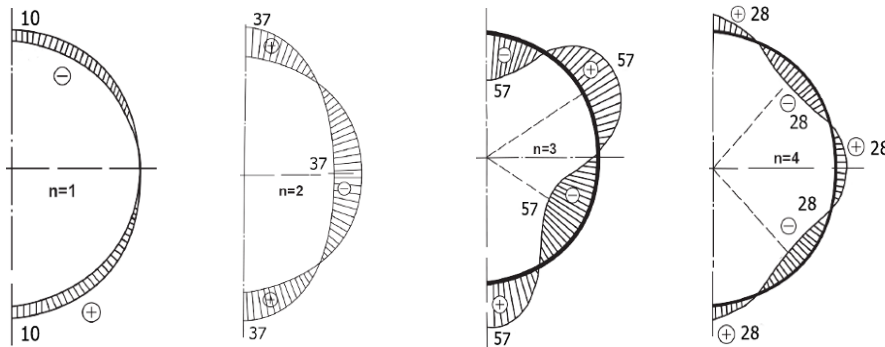


Рис.2. Эпюры нормальных напряжений для сечения $z = l/2$ при различных значениях $n = 1, 2, 3, 4$

Из рис.2 видно, что распределение напряжений в оболочке – котла цистерны существенно отличается для различных n .

Для сравнительного анализа произведен расчет НДС составной оболочечной конструкции – котла цистерны, резервуара и сильфонного компенсатора с применением комплекса ANSYS.

В третьем разделе рассматривается компьютерная реализация расчета тонкостенных стержней при циклическом нагружении с учетом влияния неоднородности упругопластических свойств и повреждаемости материалов на основе теории В.В.Москвитина. На основании известных допущений и гипотезы выражения для перемещений точек стержня при циклическом нагружении представлены в виде

$$\begin{aligned} \bar{u}_1^{(n)} &= \bar{u}^{(n)} - y\bar{\alpha}_1^{(n)} - z\bar{\alpha}_2^{(n)} + \varphi\bar{v}^{(n)} + a_1\bar{\beta}_1^{(n)} + a_2\bar{\beta}_2^{(n)}, \\ \bar{u}_2^{(n)} &= \bar{v}^{(n)} - z\bar{\theta}^{(n)}, \bar{u}_3^{(n)} = \bar{w}^{(n)} + y\bar{\theta}^{(n)}. \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь $\bar{u}^{(n)} = (-1)^n(u^{(n-1)} - u^n)$; $\bar{\beta}_2^{(n)} = (-1)^n(\beta_2^{(n-1)} - \beta_2^n)$; $\bar{\alpha}_1^{(n)}, \bar{\alpha}_2^{(n)}$ – углы поворота сечения при чистом изгибе при n -ном нагружении; $\bar{\beta}_1^{(n)}, \bar{\beta}_2^{(n)}$ – углы поперечного сдвига; $\bar{\theta}^{(n)}$ – угол кручения; $\bar{v}_1^{(n)}$ – погонная закрутка при n -ном нагружении; φ – функция кручения.

Для вывода уравнений равновесия тонкостенных стержней при циклическом нагружении используется вариационный принцип Лагранжа. Для описания упругопластических свойств стержня с учетом повреждаемости используется модифицированная обобщенная диаграмма деформирования А.П. Гусенкова – Г.В.Москвитина

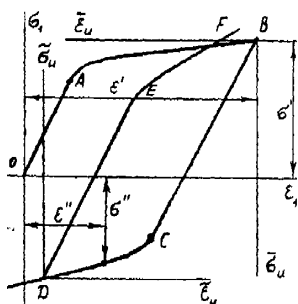
$$\frac{\bar{\varepsilon}_u^{(n)}}{\varepsilon_s} = \frac{\bar{\sigma}_u^{(n)}}{\sigma_s} + K_n \left(f \left(\frac{\bar{\sigma}_u^{(n)}}{2\sigma_s} \right) - 1 \right) + \frac{A - A^*}{A^*} K_n \left(1 - (-1)^{n-1} \right) \left(f \left(\frac{\bar{\sigma}_u^{(n)}}{2\sigma_s} \right) - 1 \right) \quad (27)$$

где параметр K_n определяется соотношениями

$$K_n = A^* / (n-1)^\alpha, \quad K_n = A^* \exp(\beta(n-2)). \quad (28)$$

Функция f определяется диаграммой исходного нагружения. Константы A^*, A, α, β являются параметрами обобщенной диаграммы циклического деформирования и определяются экспериментально (рис.3).

При линейном упрочнении функция пластичности определяется по формуле



$$\omega^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{при } \bar{\varepsilon}_u^{(n)} \leq \bar{\varepsilon}_s^{(n)}(\eta) \\ \lambda_n \left[1 - \frac{\bar{\varepsilon}_s^{(n)}(\eta)}{\bar{\varepsilon}_u^{(n)}} \right], & \text{при } \bar{\varepsilon}_u^{(n)} > \bar{\varepsilon}_s^{(n)}(\eta) \end{cases}$$

рис. 3 диаграмма циклического деформирования

где $\bar{\varepsilon}_s^{(n)}(\eta) = \alpha_1^{n-2} (1 + \alpha_1) \varepsilon_s + (3G)^{-1} B^{1/\alpha} \cdot [1 - 0,5(1 + \alpha_1) \alpha_1^{n-2}] [1 - (1 - \eta)^{1+\alpha}]^{1/\alpha} (n-1)^{-1/\alpha}$. (29)

При этом значение функции повреждаемости $\eta(n)$ определяется из модифицированного кинетического уравнения

$$\frac{d\eta}{d\lambda} = A \frac{(\bar{\sigma}_u^{(n)})^\alpha}{(1 - \gamma \eta^r)^\beta} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{1+m}{B^{1+m}} \cdot \int_0^{\lambda_N} (\lambda_N - \mu)^m (\bar{\sigma}_u^{(n)})^{\alpha(1+m)} d\mu \quad (30)$$

при условиях $\eta(0) = 0$, $\eta(\lambda_N) = 1$, где λ_N – число полуциклов до наступления предельного состояния (разрушения). Если $\gamma = 1$, $r = 1$, $\alpha = \beta$, $\lambda = t$ из уравнения (30) получается модель Качанова-Работнова. Аналогичные кинетические уравнения для повреждаемости и роста трещины предлагались И.А.Биргером, Р.Пэрисом, Е.А.Морозовым и др.

Из вариационного уравнения (2) с учетом соотношений (3) получена система дифференциальных уравнений равновесия для стержня при циклических нагружениях в векторной форме. Для решения краевой задачи используется метод конечных разностей, в процессе их аппроксимации применяется центральная разностная схема второго порядка точности. Для решения сформулированных нелинейных алгебраических уравнений с соответствующими граничными условиями используется методика акад.Т.Буриева с применением следующей рекуррентной формулы:

$$\vec{V}_i^{(k)} = \alpha_i \vec{V}_{i+1}^{(k)} + \beta_i^{(k)}; \quad i = N - 1, \dots, 1, \quad (31)$$

Где $\alpha_i^{(k)} = (\bar{B}_i^{(k)} - \bar{C}_i^{(k)} \alpha_{i-1}^{(k)})^{-1} \bar{A}_i^{(k)}$;

$$\beta_i^{(k)} = (\bar{B}_i^{(k)} - \bar{C}_i^{(k)} \alpha_{i-1}^{(k)})^{-1} (\bar{C}_i^{(k)} \beta_{i-1}^{(k)} - \bar{F}_i^{(k)}) \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, N - 1. \quad (32)$$

Для реализации расчета тонкостенных стержней при циклическом нагружении использована модифицированная комплексная программа на языке C# с учетом кинетического уравнения (30).

Материальные константы кинетического уравнения повреждаемости: $A = 1.2 \cdot 10^{-4}$; $\alpha = \beta = 5$; $\gamma = 0.8$; $\gamma = 1.0$; $\alpha_1 = 0.97$; $r = 1.2$.

Вычислены значения компонентов вектора перемещений $W^{(k)}$, $\alpha_1^{(k)}$, $\beta_1^{(k)}$, $V^{(k)}$, $\alpha_2^{(k)}$, $\beta_2^{(k)}$ и внутренних усилий $Q_1^{(k)}$, $M_y^{(k)}$, $M_{a_1}^{(k)}$, $Q_2^{(k)}$, $M_z^{(k)}$, $M_{a_2}^{(k)}$ (рис.4).

Таблица 2

Численные значения прогиба $W^{(k)}$ и угол поворота $\alpha_1^{(k)}$ при исходном и циклическом нагружениях упругопластического стержня

	x	k=1	k=2	k=5	k=6
$W^{(k)}$	0.1	-0.038498	0.038514	-0.038502	0.038515
	0.2	-0.124965	0.125019	-0.124982	0.125024
	0.4	-0.284147	0.284276	-0.284190	0.284286
	0.6	-0.284124	0.284251	-0.284166	0.284262
	0.9	-0.038463	0.038478	-0.038467	0.038480
$\alpha_1^{(k)}$	0.1	-0.724490	0.724800	-0.724583	0.724827
	0.2	-0.965903	0.966339	-0.966050	0.966376
	0.4	-0.482706	0.482927	-0.482782	0.482945
	0.6	0.483426	-0.483655	0.483511	-0.483673
	0.9	0.724772	-0.725073	0.724856	-0.725100

В частности, в табл.2 приведены численные значения $W^{(k)}$ и $\alpha_1^{(k)}$ при исходном ($k = 1$) и циклическом нагружении ($k = 2,5,6$) с учетом вторичных, третичных и т.д. пластических деформаций упругопластического стержня. Исследован характер сходимости расчетных величин.

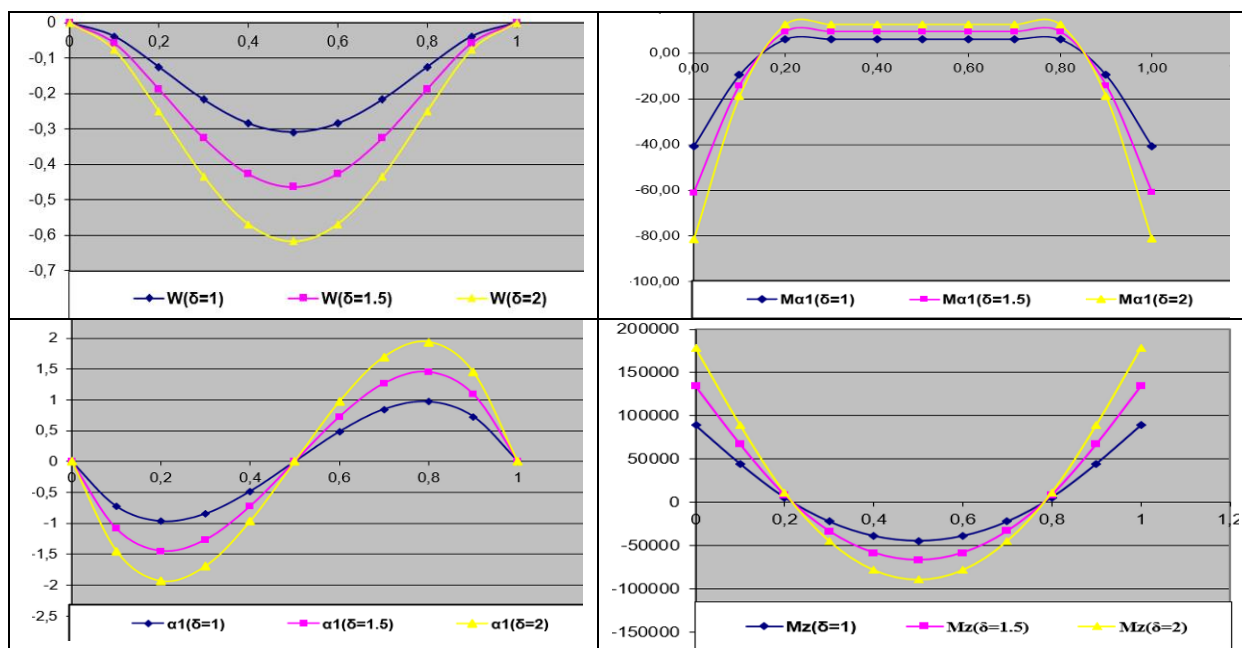


Рис .4. Изменение компонентов перемещений ($W^{(k)}$, $\alpha_1^{(k)}$) и моментов ($M_z^{(k)}$, $M_{a_1}^{(k)}$) по длине стержня ($\delta = 1;1.5;2$)

На рис.5 показано изменение зоны пластичности по циклам нагружения в поперечном сечении стержня при $k = 2,3,4,5,6$.

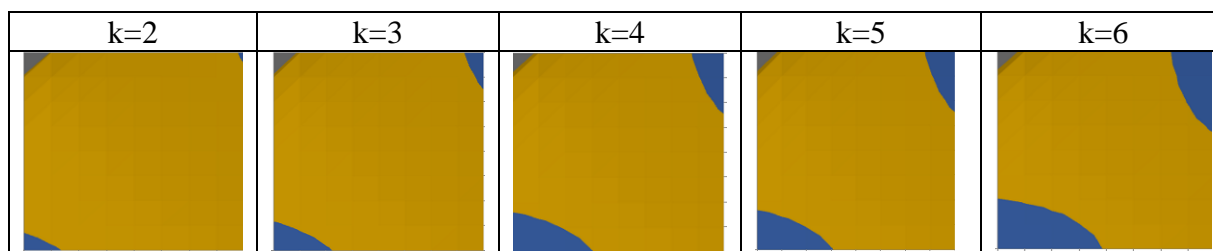


Рис-5. Изменение зоны пластичности по циклам нагружения при $k = 2,3,4,5,6$

Исследовано также напряженное состояние упругопластических осесимметричных цилиндрических оболочек, защемленных по торцам, при равномерно распределенной нагрузке с постоянной интенсивностью. Программа нагружения: $\delta^{(k)} = \delta q^{(k)}$, $q^{(k)} = (-1)^{k+1}$, $\delta = 2$, $r = 1.2$. Материал оболочки – циклически упрочняющееся D-16Т.

Анализ расчетных величин показывает, что с увеличением числа циклов нагружения изменяются значения функции пластичности и зоны поврежденности по длине элемента, т.е. проявляется влияние неоднородности упругопластических свойств материала, а это, в свою очередь влияет на НДС циклически деформируемого элемента конструкции. Результаты расчета дают возможность оценить остаточные вторичные пластические деформации, описать зоны пластичности и степень поврежденности по циклам нагружений для упрочняющихся и разупрочняющихся материалов (В-96, Д-16Т, ст.ТС). На основе принципа Мазинга–Москвитина показано, что учет вторичных пластических деформаций приводит к сняжению остаточных напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации(PhD) на тему «Численное моделирование расчета деформирования оболочечных конструкций при различных видах нагружений» сформулированы следующие выводы:

1. На основе вариационного принципа Лагранжа и Гамильтона–Остроградского разработаны математические модели расчета деформирования оболочечных конструкций. Согласно разработанной модели получена разрешающая система уравнений для осесимметричных оболочек вращения и кругового кольца (шпангоута).

2. Получены уравнения равновесия (движения) для цилиндрических и сферических упругих оболочечных конструкций с учетом переменности отношений коэффициентов Ламе и уточненных геометрических соотношений по В.З.Власову.

3. Для решения уточненных систем дифференциальных уравнений с граничными и начальными условиями разработаны дискретные модели на основе комбинированного метода Бубнова–Галеркина и конечных разностей.

4. Сформулированы разностные краевые задачи, построены вычислительные алгоритмы расчета цилиндрических и сферических оболочечных конструкций при различных видах нагружений с применением метода прогонки. Сформулированные краевые задачи позволяют определить напряженно-деформированные состояния оболочечных конструкций.

5. Разработана компьютерная реализация решения задач оболочечных конструкций. Создана структура программных средств для расчета цилиндрических оболочечных конструкций при статических нагружениях. Разработанная программа и созданный интерфейс предполагают вывод результатов расчета в виде таблицы и графиков и предоставляют возможность анализировать напряженно-деформированные состояния конструкций.

6. Разработаны методика и процедура расчета цилиндрической оболочки – котла цистерны. Разработанная методика расчета по полубезмоментной теории дает возможность построить упрощенное аналитическое решение и анализировать распределение расчетных величин – напряжений, перемещений и моментов. Показано в рассматриваемой задаче, что цилиндрическая оболочка котла-цистерны претерпевает значительные деформации и напряжения при действии внутреннего давления. Произведен расчет для сравнительного анализа НДС котла-цистерны с применением комплекса ANSYS.

7. Разработаны алгоритмы расчета несущих элементов тонкостенных конструкций – стержней и осесимметричных цилиндрических оболочек при циклических нагружениях с использованием уравнения состояний, где интенсивность напряжений является функцией повреждаемости и циклов нагружений. Результаты расчета дают возможность описать кинетики НДС с учетом вторичных пластических деформаций по циклам нагружений для упрочняющихся и разупрочняющихся материалов (В-96, Д16Т, ст.ТС).

8. На основе анализа результатов установлено, что учет циклических пластических деформаций приводит к снижению остаточных напряжений. Показано, что с увеличением числа циклов нагружений изменяются зоны пластичности и поврежденности, а напряженное состояние конструкции из упрочняющихся материалов переходит в предельное состояние.

9. Разработанные алгоритмы и программные средства апробированы и внедрены на объектах предприятий “Tashkent metroproekt”, “Узогирсаноат-лойиха” и “Литейно-механический завод” при выполнении проектно-изыскательных работ. Программное обеспечение позволило сократить срок вычислительного процесса в 1.8 раза за счет высокой точности и эффективности разработанных методов и повышения результативности проектных работ на 12–18%.

**ONE-TIME SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 ON
AWARDING THE SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF
MECHANICS AND SEISMIC STABILITY OF STRUCTURES OF AS RUz**

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

SABIROV NIZAMBAY XATIYBAEVICH

**NUMERICAL SIMULATION OF THE CALCULATION OF THE
DEFORMATION OF ENVELOPE STRUCTURES AT DIFFERENT TYPES
OF LOADING**

01.02.04 - Mechanics of a deformable solid

05.01.07 - Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes.

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

TASHKENT-2020

The subject of the doctor of philosophy dissertation to technical sciences (PhD) is registered in the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2019.3.PhD/T556.

The dissertation was completed at the Tashkent State Transport University.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is posted on the website of Scientific Council (www.instmech.uz) and information-educational portal «Ziyonet» at the address (www.ziyonet.uz)

Scientific adviser: **Abdusattarov Abdusamat**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Scientific consultant: **Yuldashev Tadjimat**
Doctor of Technical Sciences

Official opponents: **Yuldashev Sharafitdin Sayfitdinovich**
Doctor of Technical Sciences, Professor
Nuraliyev Faxriddin Mirodullayevich
Doctor of Technical Sciences, dosent

Leading organization: **National University of Uzbekistan**

The defense will take on “ 16 ” december 2020 at 14 00 at the meeting of the One-time Scientific Council based on the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of AS RUz. (Address: 100125, Tashkent, Do'rmon yo'li St., 33, Conference Hall №2. (Phone/fax: (99871) 262-71-32, (99871) 262-71-52; e-mail: instmech@academy.uz).

The thesis is available in the Information Resource of Fundamental library library Fundamental library (registration number –). Address 100125, Tashkent, Ziyolilar street, 13.

Abstract of dissertation sent out on “ 03 ” december 2020 year.
(mailing report № _____ on “ _____ ” _____ 2020 year).



M.M.Mirsaidov
Chairman of the seminar under the One-time scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences, Doctor of technical sciences, professor, Academician of Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan

M.K. Usarov
Scientific secretary of the seminar under the One-time scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences, Doctor of physical and mathematical sciences, Senior Fellow

R.A.Abirov
Chairman of the seminar under the One-time scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences, Doctor of physical and mathematical sciences, Senior Fellow

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research is the development of mathematical models of deformation of thin-walled shell structures under static and dynamic loading, as well as calculation algorithms and software tools for analyzing the SSS (Stress-Strain State) elements of shell structures and for various types of boundary and initial conditions.

The object of the research work is composite shell structures, tank boilers and thin-walled rods under various types of loading.

The scientific novelty of the work is as follows:

-on the basis of the Hamilton-Ostrogradsky variational principle, models of deformation of shell structures supported by frames and stringers were formed;

-refined computational models of deformation of the cylindrical and spherical parts of composite shell structures have been developed;

-methods for solving the boundary value problem for a cylindrical and spherical shell under static and dynamic loading have been developed;

-computer implementation of the calculation of cylindrical shell structures have been developed;

-a multiparameter analysis of the SSS (Stress-Strain State) elements of thin-walled structures under various types of loading was performed.

Implementation of research results. On the basis of the developed mathematical models for the calculation of shell structures using a variational method and finite differences, a corresponding set of programs has been created for analyzing and estimating the SSS of shell structures under various types of loading:

Computational algorithms were developed, constructed discrete circuits based on the finite difference method and the created complex of applied programs have been introduced at the facilities of the enterprises of “Tashkent Metroproekt” LLC (Information on the implementation of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan dated September 9, 2019 No. 6576/09–07). The software made it possible to reduce the time of the computing process by 2 times due to the high accuracy and efficiency of the developed methods and increase the efficiency of design work by 12-18%;

Developed mathematical models of deformation of cylindrical shell structures under static loads, computational algorithms using the finite difference method, and a set of application programs are implemented at the facilities of JSC “Uzog’irsanoatloyiha” (certificate of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan №6575/09-07 dated September 9, 2019 No. 6576/09-07). The software allowed reducing the computational process time by 1.5 times due to the high accuracy and efficiency of the developed methods and increasing the effectiveness of project work by 10-15%;

Constructed discrete models based on the combined method and the created complex of programs were introduced at the facilities of the DP “Foundry-Mechanical Plant” (Act, Subsidiary DP “Foundry-Mechanical Plant” dated May 13, 2019). The developed program made it possible to reduce the time of the

computing process by 1.8 times, to increase the accuracy and efficiency of design work by 15-20%;

The introduction of scientific results into design practice allows to reduce the search cycle for rational and technical solutions, reduce the material consumption of structures, reduce the volume and costs of experimental research, increase the accuracy of calculations for VAT and reduce the destruction of thin-walled structures.

Publications of research results. On the topic of the thesis published 39 scientific papers. These are 1 monograph, 19 scientific articles, including 3 in foreign and 16 in republican journals, recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD), as well as 2 registration certificates were received computer software.

Volume and structure of dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, references and appendixes. The volume of the dissertation is 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS
I бўлим (I часть; I part)

1. Абдусаттаров А., Сабилов Н.Х. Численное моделирование процессов деформирования оболочечных конструкций при различных видах нагружений. – Ташкент, «Узбекистан», Монография, 2018. -144с.

2. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Сабилов Н.Х. К выводу дифференциальных уравнений движения цилиндрической части оболочечных конструкций типа цистерны // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2015. -№3/4, – С. 33-40, (05.00.00; №11).

3. Абдусаттаров А., Расулмухаммедов М.М., Сабилов Н.Х. К процедуре расчета цилиндрических оболочечных конструкций с применением комбинированного метода // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2015. -№1, – С.43-49, (05.00.00; №11).

4. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Сабилов Н.Х., Уравнения движения и формирование разностной краевой задачи цилиндрической части оболочечных конструкций // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2016. -№ 4, –С.29-37, (05.00.00; №11).

5. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Сабилов Н.Х. К формированию разностной краевой задачи сферической части составных оболочечных конструкций // Вестник ТашИИТ. Ташкент, 2017. -№1, – С. 35-44, (05.00.00; №11).

6. Сабилов Н.Х. К процедуре расчета цилиндрической оболочки-котла цистерны по полубезмоментной теории // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2017. -№2/3, – С. 51-54, (05.00.00; №11)

7. Абдусаттаров А., Сабилов Н.Х. К решению разностных краевых задач составных оболочечных конструкций типа цистерны // Узб. журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2018. -№1, – С.6-12, (05.00.00; №6).

8. Сабилов Н.Х. К выводу вариационного уравнения равновесия осесимметричных оболочечных конструкций // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2018. -№1, – С. 54-58, (05.00.00; №11).

9. Абдусаттаров А., Исомиддинов А.И., Сабилов Н.Х. Численный расчет тонкостенных стержней и цилиндрических оболочек при статическом нагружении с учетом физической нелинейности // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2018. -№2/3, – С. 35-40, (05.00.00; №11).

10. Сабилов Н.Х., Жуманиёзов Х.Ж. Қўшма конструкция–цистернанинг кучланганлик ва деформацияланганлик ҳолатини ANSYS дастури асосида тадқиқ қилиш. // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2018. - №2-3, –С.78-85, (05.00.00; №11).

11. Сабилов Н.Х. Компьютерная реализация решения задача составных оболочечных конструкций-котла цистерны // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2018. -№4, – С. 47-54, (05.00.00; №11).

12. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х., Исомиддинов А.И. Исследование кинетики напряжённого состояния тонкостенных упругопластических стержней с учетом диаграммы циклического деформирования и повреждаемости // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2019. -№1. – С.46-57, (05.00.00; №11).

13. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х., Исомиддинов А.И. К вопросу деформирования и повреждаемости тонкостенных оболочечных конструкций и стержней в пределах и за пределами упругости (обзор) // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2019. -№1, – С.158-164, (05.00.00; №11).

14. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х. Исследование НДС цилиндрической оболочки-котла цистерны по полубезмоментной теории // Узб. журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2019. -№2, – С.3-8, (05.00.00; №6).

15. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х., Абдукадиров Ф.Э. К формированию вариационного уравнения движения и краевых задач, тонкостенных осесимметричных оболочечных конструкций // Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2019. -№2, – С.38-46, (05.00.00; №11).

16. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х., Абдукадиров Ф.Э. К построению дискретных моделей и алгоритм реализации расчета оболочечных конструкций типа цистерны // TUIT, «Проблемы вычислительной и прикладной математики», 2019,-№5, – С.62-71, (05.00.00; №10).

17. Sabirov N.Kh., Abdusattarov A. Modular structure of the calculation of composite shell Structures – tank boiler at various types of loading // International journal of advanced research in science, engineering and technology. -India, 2019.-Volume 6, Issue 2, №9, -Pp. 8056-8063.

18. Abdukadirov F.E., Sabirov N.Kh., Abdusattarov A. Equations of motion and difference schemes for calculating rods under spatially variable loading // International journal of advanced research in science, engineering and technology. -India, 2019.-Volume 6, Issue 2, №6, -Pp. 11000-11011.

19. Sabirov N.Kh., Abdusattarov A., Abdukadirov F.E. Numerical calculation of elements of thin-walled structures under alternating loading taking into account damage // Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems, IOP Publishing, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1479 (2020) 012143(Scopus).

20. Абдусаттаров А., Абдукадиров Ф.Э., Сабиров Н.Х. Исследование НДС и собственных колебаний оболочечных конструкций с учетом неупругих свойств материалов // Узб. журнал «Проблемы механики». –Ташкент, 2020. -№1-2, – С.10-15, (05.00.00; №6).

И-бўлим (И часть; И part)

21. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Сабиров Н.Х. К выводу вариационного уравнения движения цилиндрической оболочки // Материалы Республиканской научно-технической конференции, 14-15 май 2015. – Самарканд, 2015. – С.117-120.

22. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Сабиров Н.Х. О разработке математических моделей и методов исследований прочности составных оболочечных конструкций типа котла цистерны // Материалы межвузовской научно-практической конференции, «Инновационные технологии в строительстве», – Ташкент, 2015. выпуск 10. – С.16-18.

23. Сабиров Н.Х., Юлдашев Т., Абдусаттаров А. Построение дискретных моделей расчета цилиндрической части оболочечных конструкций при динамическом нагружении // Материалы Международной научной конференции. 29-30 май 2017. -Самарканд, 2017. – С.115-120.

24. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Сабиров Н.Х., Расулмухамедов М.М. Уравнения движения и формирование разностной краевой задачи составных оболочечных конструкций // Материалы Международной научной конференции «Современное состояние и перспективы развития строительной механики». 16-17 июнь 2017. – Самарканд, 2017. – С.290-293.

25. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Сабиров Н.Х. К выводу разрешающих систем уравнений для сферических оболочечных конструкций // Материалы Международной научной конференции. ТАСИ 17-18 март 2017. –Ташкент, 2017. I-часть, – С.160-163.

26. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Сабиров Н.Х. К построению расчетной модели сферической части оболочечных конструкций. // Материалы Республиканской научно-практической конференции. 11 апрель 2017. – Наманган, 2017. – С.9-13.

27. Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Сабиров Н.Х. К построению расчетной модели деформирования сферической части составных оболочечных конструкций. // Материалы Республиканской научно-практической конференции. ТАСИ 6 мая 2017. –Ташкент, 2017. часть II, – С.27-29.

28. Сабиров Н.Х. К выводу вариационного уравнения равновесия осесимметричных оболочечных конструкций // Хорижий олимлар иштирокидаги республика илмий –техник анжумани мақолалари. ТашТЙМИ 5-6 декабрь 2017. –Ташкент, – С.100-102.

29. Сабиров Н.Х., Абдусаттаров А. О методах расчета составных оболочечных конструкций-котла цистерны при различных видах нагружений // Хорижий олимлар иштирокидаги республика илмий – техник анжумани мақолалари. ТашТЙМИ 5-6 декабрь 2017. –Ташкент, –С. 109-112.

30. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х. Формирование уточненной модели и решение краевой задачи цилиндрической части оболочечных конструкций-котла цистерны // Сборник докладов Республиканской научно-практической конференции «Механика деформируемого твердого тела». – Ташкент, 2018. том-1, – С.70-79.

31. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х. Математические модели расчета тонкостенных стержней и оболочечных конструкций при различных видах нагружений // Материалы Международной научной конференции. 10 июль 2018. – Наманган, 2018. часть II, – С.366-368.

32. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х. Применение метода Бубнова-Галеркина к решению краевой задачи сферической оболочки // Материалы Республиканской научной конференции «Современное состояние и перспективы развития строительной механики». 2-3 июнь 2018. –Самарканд, 2018, – С.29-33.

33. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х. Моделирование решения задач составных оболочечных конструкций с применением метода конечных разностей // «Ахборот коммуникация технологиялари ва дастурий таъминот яратишда инновацион ғоялар» республика миқийсидаги илмий ва илмий-техникавий анжумани, ТАТУ Самарканд филиали, 16-17 апрель 2019 й, –С.149-152.

34. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х., Исомиддинов А.И. Модульная структура расчета тонкостенных оболочечных конструкций при различных видах нагружений // «Замонавий архитектура, бинолар ва иншоотларнинг мустакамлиги, ишончилиги ва сеймик хавфсизлик муаммолари» мавзусидаги республика илмий-амалий анжумани, 2 май 2019й. – НМҚИ, –С.92-94.

35. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х., Исомиддинов А.И. Численное моделирование решения задач упругопластических стержней при циклическом пространственном нагружении с учетом повреждаемости материалов. // Материалы республиканской научно-практической конференции с участием зарубежных ученых. «Инновационные технологии в строительстве», выпуск 14, –Ташкент 2019. – ТашИИТ, – С.7-10.

36. Абдусаттаров А., Абдукадиров Ф.Э., Сабиров Н.Х. Численный расчет элементов тонкостенных конструкций при повторно - переменном нагружении с учетом повреждаемости // Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики», ноябрь 2019, – Воронеж, – С.152-160.

37. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х., Абдукадиров Ф.Э. Модели и алгоритмы расчета цилиндрической части оболочечных конструкций // Международной научно-практической конференции «Проблемы технико-технологических систем и физико-математических моделей», – Самара 2020. –С.3-6.

38. Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х., Расулмухаммедов М.М Программа расчета цилиндрических оболочечных конструкций при статических нагружениях // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство №DGU 05551. 10.08.2018 г.

39. Сабиров Н.Х., Абдусаттаров А. Программа расчета несущих элементов тонкостенных конструкций при переменных нагружениях с учетом накопления повреждений // Агентство по интеллектуальной собственности при министерстве юстиции РУз. Свидетельство №DGU 08226. 15.05.2020 г.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«ГТЙМИ Ахборотномаси» илмий-амалий журнали таҳририясида
таҳрирдан ўтказилди ва матнлар мослиги текширилди

Босишга рухсат этилди: 02.12.2020 йил.

