САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc30.08.2018.FM/T.02.09 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ХУДАЙБЕРДИЕВ ЗОКИР БОЗОРБОЕВИЧ

УЧ ҚАТЛАМЛИ КОМПОЗИТ ПЛАСТИНКАНИНГ НОСТАЦИОНАР ТЕБРАНИШЛАРИ

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси АВТОРЕФЕРАТИ

Самарқанд – 2019

УДК:539.3

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси

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

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

Худайбердиев Зокир Бозорбоевич
Уч қатламли композит пластинкаларнинг ностационар тебранишлари........... 3

Худайбердиев Зокир Бозорбоевич
Нестационарные колебания трехслойных композитных пластин.................. 21

Khudayberdiyev Zokir Bozorboyevich
No stationary vibrations of three layered composite plate 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works 43

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc30.08.2018.FM/T.02.09 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ХУДАЙБЕРДИЕВ ЗОКИР БОЗОРБОЕВИЧ

УЧ ҚАТЛАМЛИ КОМПОЗИТ ПЛАСТИНКАНИНГ НОСТАЦИОНАР ТЕБРАНИШЛАРИ

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси АВТОРЕФЕРАТИ

Самарқанд – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.3.PhD/FM135 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат техника университети ва Самарқанд давлат университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:	**Худойназаров Хайрулла** техника фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Абдикаримов Рустамхан Алимханович** физика-математика фанлари доктори, профессор **Усаров Махаматали Корабоевич** физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	**Тошкент темир йўл транспорти муҳандислари институти.**

Диссертация ҳимояси Самарқанд давлат университети ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc30.08.2018.FM/T.02.09 рақамли илмий кенгашнинг 2019 йил «25» ноябрь куни соат 11⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 140104, Самарқанд ш., Университет хиёбони, 15. Тел.: (8366) 2351938. Факс: (8366)2351938. E-mail: sasu_info@edu.uz.

Диссертация билан Самарқанд давлат университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (100 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 140104, Самарқанд ш., Университет хиёбони, 15. Тел.: (8366) 2351938. Факс: (8366)2351938.

Диссертация автореферати 2019 йил «14» ноябрь куни тарқатилди.
(2019 йил «14» ноябрь даги 6 рақамли реестр баённомаси).

Р.И.Халмурадов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, техника фанлари доктори, профессор

А.Абдирашидов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, физика-математика фанлари доктори, доцент

А.З.Хасанов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, техника фанлари доктори, профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда техника ва қурилишнинг турли соҳаларида ишлатиладиган қатламли конструкциялар динамикасини ўрганишда, хусусан, динамик деформациянинг янги моделини ишлаб чиқишда, экспериментга яқин, самарали математик ва сонли усулларни қўллашга катта эътибор қаратилмоқда. Сўнги йилларда АҚШ, Франция, Япония, Хитой, Россия Федерацияси ва бошқа ривожланган мамлакатларда муҳандислик қурилмалари мустаҳкамлигини ошириш мақсадида турли хилдаги қатламли конструкциялардан фойдаланилмоқда ва уларни ҳисоблашда ноклассик моделлар қўлланилмоқда. Шунинг учун замонавий талабларга кўра қурилмаларнинг ташқи оғирлик кўрсаткичларини камайтириш орқали саноатда ва қурилишда мустаҳкамлиликнинг таъминланиши натижасида иқтисодий жиҳатдан фойда олиниши муҳим аҳамиятга эга. Кўпгина хорижий мамлакатларда, жумладан, АҚШ, Россия, Англия, Франция, Япония, Германия ва бошқа ривожланган давлатларда шундай соҳаларни лойиҳалаш методларини ривожлантириш ва такомиллаштириш учун қурилишда, машинасозлик ва кемасозликда, динамик кучланган-деформацияланган ҳолати (КДҲ)ни ўрганиш, конструкциялар тутиб туриш лаёқатини ошириш масаласи ва ҳисоби, динамик юкланишлар, хусусан, эластик зарба, импульсли ва кўзғалувчан юкланиш ҳамда зарба тўлқини таьсирига алоҳида эътибор берилади.

Жаҳонда кўп қатламли қурилмалар таркибий элементларининг ностационар харакатларини, хусусан, турли ташқи динамик юкланишлар таьсири остидаги уч қатламли пластинкаларни ўрганишга қаратилган кўплаб илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Бундай мустаҳкамлик билан боғлиқ масалаларда, хусусан, динамик юкланишлар таьсири остидаги уч қатламли пластинка элементларини ҳисоблаш масалаларида математик моделларни ва ҳисоблаш усулларини такомиллаштиришга алоҳида эътибор берилмоқда. Ностационар тебранишлар жараёнининг математик моделини тузиш, ер ва сув ости муҳандислик конструкциялари, аэрокосмосдаги бундай элементларнинг КДҲ ҳамда уларни сонли тадқиқ қилиш деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси соҳасида зарур ҳисобланади.

Республикамизда қурилиш ва техника соҳасида турли динамик юкланишлар таъсири остида бўлган тутиб турувчи ва кўтарувчи қобилиятли қурилиш конструкциялари деформациясини ҳисоблаш модели ва алгоритмини яратиш ва амалиётга кенг тадбиқ этиш чора-тадбирларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан, «... ишлаб чиқаришни моденизация қилиш, техник ва технологик жиҳатдан янгилаш, ишлаб чиқариш...., ... тежамкор ва самарали замонавий технологияларни босқичма-босқич жорий этиш ...»[1] вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан

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

қурилмаларнинг юк кўтариш қобилиятларини уч қатламли композит пластинкалар орқали ошириш мақсадида қурилмалар элементларининг деформацияланиш жараёнларини ифодаловчи такомиллаштирилган математик моделларни яратиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 9 августдаги ПҚ-3190-сон «Ўзбекистон Республикаси ҳудуди ва аҳолисининг сейсмик хавфсизлиги, сейсмик чидамли қурилиш ва сейсмология соҳасида илмий тадқиқотлар ўтказишни янада ривожлантириш чора-тадбирларини тўғрисида»ги, 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида», 2018 йил 2 февралдаги ПҚ-3502-сон «2018-2022 йилларда аҳоли пунктларини бош режалар билан таъминлаш, лойиҳа ташкилотлари фаолиятини яхшилаш, шунингдек, шаҳарсозлик соҳасида мутахассислар тайёрлаш сифатини ошириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолият соҳасига тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни бажаришга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Юртимизда ва хорижий давлатларда техника ва қурилишнинг турли соҳаларида кўп қатламли, хусусан, уч қатламли пластинкалар кенг қўлланилади. Бунда жуда кўп ҳолларда пластинкаларнинг динамик ҳисоби Кирхгоф гипотезаларига асосланган классик назарияга таянган ҳолда олиб борилади. Бундай ишлар жуда кўп. Классик назариянинг бундан кейинги ривожи С.Г.Лехницкий, С.А.Амбарцумян, Г.И.Петрашен, И.Г.Филиппов, Х.Алтенбах, E.Reysner, Э.И.Григолюк, В.П.Шевченко, М.В.Фоменко, Х.Х.Худойназаров, М.Мирсаидов, Р.И.Халмурадов, А.Б.Ахмедов ва бошқа таниқли олим ва тадқиқотчилар томонидан амалга оширилди, бундай тадқиқотларни қуйидаги икки йўналишга бўлиш мумкин: асимтотиклик назария ҳамда Тимошенко ва Рейсснер типидаги назарияларни ишлаб чиқиш. Кейинги бир неча ўн йилликларда Г.И.Петрашеннинг аниқ ечимлар усулига асосланган пластинка тебранишлари назариялари ишлаб чиқилган. Ушбу усулнинг турли вариантлари бир жинсли ва уч қатламли эластик ва қовушоқ-эластик пластинкалар учун профессор И.Г.Филиппов ва унинг ўқувчилари томонидан ишлаб чиқилган. Ушбу уч қатламли пластинкалар тебраниш тенгламаларини олишда қуйидаги камчиликларга йўл қўйилган: 1) фақат симметрик структурага эга бўлган уч қатламли пластинкалар қаралган; 2) изланувчи катталиклар сифатида пластинка тўлдирувчи қатлами ўрта сирти кўчишлари компоненталарининг бош қисмлари қабул қилиниб, бундай номаълум изланувчиларнинг умумий сони олтига тенг. Агар чегаравий шартлар аниқ шакллантириладиган бўлса бундай номаълум изланувчилар сони, муаллифларнинг ўзларининг тан олишларига кўра, 12 (ўн икки) тага етади; 3) чегаравий шартлар тўдирувчи қатлам ўрта сирти кўчишларининг бош қисмларига нисбатан шакллантирилганки, умуман олганда бу нарса принципиал нотўғри; 4) санаб ўтилган факторлар, охир-оқибатда муҳим соддалаштиришларни амалга оширишга мажбур этган, ўз навбатида уч қатламли пластинканинг олинган натижавий тебраниш тенгламаларини бир жинсли пластинканинг тебраниш тенгламаларига жуда яқин ҳолатга келтириб қўйган; 5) уч қатламли пластинканинг олинган тебраниш тенгламалари, хусусий ҳолда, икки қатламли пластинканинг тебраниш тенгламаларига ўтмайди (чунки қаралаётган уч қатламли пластинканинг структураси симметриклиги учун, пластинка ташқи қатламларидан бирининг олиб ташланиши автоматик тарзда иккинчи ташқи қатламнинг йўқотилишига олиб келади).

Бугунги кунда турли ташқи динамик юкланишлар таъсири остидаги қатламли пластинкаларнинг эластик-қовушоқлик хоссалари ҳисобга олинган уч қатламли қовушоқ-эластик пластинканинг ностационар тебранишлари назарияси, масалаларини ечиш усули ва алгоритмларни ишлаб чиқишдаги муаммолар етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқотлари Самарқанд давлат университетининг илмий тадқиқот ишлари режасининг «Деформацияланувчи муҳит билан ўзаро таьсирлашувчи дискрет-узлуксиз системалар устиворлиги ва тебранишларини тадқиқ қилиш» (2000-2020) мавзудаги тадқиқот ишлари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади уч қатламли пластинканинг ностационар тебранишлари динамик ҳисоб усулини ишлаб чиқиш; тебранувчи пластинка ихтиёрий кўндаланг кесими нуқталари кучланиш ва кўчишларини аниқлашни математик моделини ва алгоритмини яратиш; ишлаб чиқилган методикани статик, импульсли ва бошқа юкланишлар таьсири остидаги уч қатламли пластинкаларни ҳисоблаш ҳолатларига қўллашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

динамик юкланишлар таьсиридаги қатламли пластинкаларни ҳисоблашни янги усулини ишлаб чиқиш;

динамик юкланишлар таьсирига учраган уч қатламли пластинка тебранишлари янги амалий масаласини қўйиш ва мос сонли ҳисоб усулини ишлаб чиқиш;

ташувчи ва тўлдирувчи қатламларнинг геометрик ва эластик ҳарактеристикаларининг пластинка тебранишлари частотасига ва амплитудаси ҳамда кучланган-деформацияланган ҳолатига таьсирини аниқловчи кўрсаткичларни ҳисоблаш;

турли хил динамик юкланишлар таьсиридаги ҳамда ҳар хил чегаравий шартли уч қатламли пластинкани ҳисоблашга имкон берадиган, икки қатламли ва бир жинсли пластинкалар учун ҳам ўринли бўлган алгоритм яратиш;

Тадқиқотнинг объекти сифатида замонавий техника ва қурилишда кенг фойдаланиладиган қовушоқ-эластик уч қатламли пластинка олинган.

Тадқиқотнинг предмети турли, вақтга боғлиқ ўзгарувчи юкланишлар таьсиридаги қовушоқ-эластик уч қатламли пластинка динамикасини ўрганиш ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида асосий тадқиқот усули сифатида Г.И.Петрашен – И.Г.Филипповнинг гипотеза ва аксиомаларни қўлламасдан тенгламаларни келтириб чиқариш усули, Фуре ва Лапласнинг интеграл алмаштиришлар усуллари, ҳамда тадқиқотчилар томонидан кўп маротаба синалган бошқа аналитик ва сонли усуллардан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

динамик юкланишлар таьсиридаги қатламли пластинкаларни ҳисоблашни янги усули таклиф этилган;

зарб тўлқини ва динамик юкланишлар таьсирига учраган уч қатламли пластинка тебранишлари ҳақида янги амалий масалалар қўйилган ва ечилган;

платинканинг тебранишлари ва кучланган-деформацияланган ҳолатига ташувчи ва тўлдирувчи қатламлар геометрик ва эластик ҳарактеристикалари таьсирини аниқловчи кўрсаткичлар олинган;

турли хил динамик юкланишлар таьсиридаги ҳамда ҳар хил чегаравий шартли уч қатламли пластинкани ҳисоблашга имкон берадиган, икки қатламли ва бир жинсли пластинкалар учун ҳам ўринли бўлган алгоритм яратилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

динамик юкланишлар таьсири остидаги уч қатламли пластинкаларни аналитик ва сонли ҳисоблаш учун формулалар ва математик модел таклиф қилинди;

уч қатламли пластинка КДҲ ҳисоблаш ва эркин тебранишлар частоталари ва шаклларини аниқлаш масаласи, ҳамда пластинка четлари турлича маҳкамланганда уч қатламли пластинка тебранишлари масалалари ечимлари ҳисобланди;

динамик, хусусан импульсли юкланиш таьсири остидаги уч қатламли пластинканинг тебранишлари масаласининг ечими олинди;

турли чегаравий шартларда ва ташқи юкланишларда уч қатламли пластинкалар динамикасини ҳисоблашга имкон берувчи сонли ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги асосий натижалар замонавий қурилиш ва техниканинг амалий эҳтиёжлари замирида шаклланган масалаларга асосланган ва тадқиқотчилар томонидан кўп маротаба синалган математик ва сонли усулларни қўллаш натижасида олинган. Ишлаб чиқилган формулалар ва сонли ечимларнинг ишончлилиги систематик текширишлар, бошқа ўхшаш тадқиқотлар натижалари билан солиштириш, ҳамда хусусий ҳолда бир жинсли пластинка учун кенг миқёсда маьлум бўлган натижалар таққослаш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти уч қатламли пластинкалар динамикаси масалаларини ечиш усулларини ривожлантириш; вақт давомида ўзгарувчи юкланишлар таьсиридаги уч қатламли пластинканинг тебранишлари ҳақидаги янги масалаларни ечиш ҳамда ишлаб чиқилган методикаларни четлари турлича маҳкамланган пластинка ва хусусан икки қатламли ва бир жинсли пластинкалар учун умумлаштириш имконияти билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти ташқи динамик юкланишлар таьсири остидаги уч қатламли эластик ва қовушоқ-эластик пластинкаларнинг КДҲ ҳақидаги амалий масалаларни ечиш учун аналитик-сонли алгоритмлар яратишдан иборат; ундан ташқари олинган натижалар умумий ҳарактерга ега бўлиб уларни хусусий ҳолларга, масалан икки қатламли ва бир қатламли пластинкаларнинг қатламларидаги реологик, анизотропик ва бошқа хоссаларини эьтиборга олган ҳолда қўллаш мумкин. Олинган натижаларни қурилиш ва техника соҳасидаги уч қатламли пластинкалар ҳолатини сон ва сифат жиҳатдан таҳлил қилиш амалий масалаларни ечишда фойдаланиш мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларнинг жорий қилиниши. Уч қатламли композит пластинкалар ностационар тебранишлари сонли таҳлили учун ишлаб чиқилган математик моделлар, ҳисоблаш усуллари, алгоритмлар ва дастурий таминотлар асосида қуйидагилар амалга оширилди:

қўзғалмас лекин динамик қўзғалувчан юклар таьсири остидаги уч қатламли пластинка эгилиши ҳисоби «Меьмор Уткир Човка» МЧЖда пластинка зичлигини таминловчи қатламли алматуралар ўлчамларини алмаштириш жараёнига жорий қилинган (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг 2018 йил 8 июндаги №1186/30-01-сон маълумотномаси). Натижада пластинкани арматураларнинг ўрта зич қатлами билан кучайтиришнинг олди олинди. Бу арматуралар орасидаги масофани 0.05 *м* га узайтиришга имкон берди ва металл сарфи олдиндан белгиланган миқдорга нисбатан 20% тежалди;

уч қатламли пластинканинг деформацияланган ҳолати ҳисоби «Меьмор Уткир Човка» МЧЖда пластинканинг энг катта эгилиш нуқталарини аниқлаш жараёнига жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг 2018 йил 8 июндаги №1186/30-01-сон маълумотномаси). Натижада бундай нуқталарни мустаҳкамлаш йўли пластинканинг юк кўтариш қобилятини 12-14%га ошириш имконини берган;

маълум критериялар бўйича устиворлик шартларини сақлаган ҳолда, уч қатламли ва икки қатламли пластинкалар устиворлигини баҳолаш учун, пластинка текислигига нормал кучланишлар майдони ҳисоби «СВП МАСКАН» МЧЖда уч қатламли пластинка КДҲ ва устуворлигини аниқлаш жараёнига жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг 2018 йил 8 июндаги №1186/30-01-сон маълумотномаси). Натижада бу материал сарфини 5-10%га тежаш имконини берган;

қўзғалмас лекин динамик ва қўзғалувчан юкланиш таьсири остидаги уч қатламли пластинканинг эгилиши ҳисоби «СВП МАСКАН» МЧЖда пластинкани арматуранинг зич қатлами билан кучайтириб юборишнинг олдини олиш жараёнига жорий қилинган (Ўзбекистон Республикаси Қурилиш вазирлигининг 2018 йил 8 июндаги №1186/30-01-сон маълумотномаси). Натижада ораёпма пластинканинг уч қатламлилигини ҳисобга олган ҳолда унинг кучланган-деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблаш қурилманинг оғирлигини 7% га камайтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 1 та халқаро ва 7 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот мавзуси бўйича жами 13 та илмий иш чоп этилган бўлиб, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 5 та илмий мақола, жумладан, 4 таси республика, 1 таси хорижий журналларда чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, учта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 120 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида муаммонинг долзарблиги ҳақида батафсил маълумотлар берилган, диссертация ишининг мақсади, ишлаб чиқилиши лозим бўлган асосий масалалар ёритилган, ҳимояга олиб чиқилаётган асосий илмий янгиликлари баён қилинган. Ишда олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти, диссертация натижалари маьруза қилинган конференция ва семинарлар рўйхати келтирилган, ишнинг тузилиши ва ҳажми баён этилган.

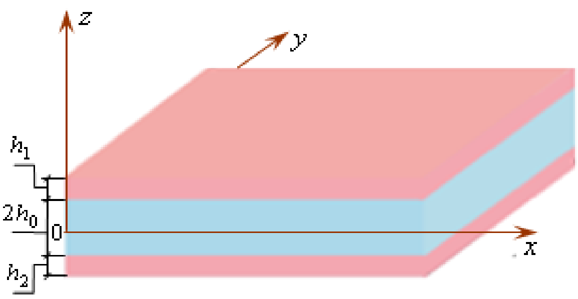
Диссертациянинг «**Уч қатламли қовушоқ-эластик пластинканинг ностационар тебранишлари. Илмий тадқиқотлар шарҳи**» деб номланган биринчи боби эластик жисм ва кўп қатламли стерженлар, пластинкалар ва қобиқлар каби инженерлик конструкция элементлари умумий шарҳи ва ҳолатини ўрганишга бағишланган. Диссертация иши доирасида олиб бориладиган кейинги тадқиқотлар учун умумий дастурни ишлаб чиқиш, ҳамда асосий ҳал этувчи уч қатламли пластинка тебраниш тенгламаларини танлаш.

1.1 параграфда диссертация иши мавзуси бўйича илмий мақолаларни ўрганиш натижасида кўп қатламли стержен пластинка ва қобиқлар динамикаси асосий йўналишлари ёритилган. Бунда асосий урғу инженерлик конструкциялари кўп қатламли элементларига, хусусан икки ва уч қатламли пластинкаларга қаратилган.

Диссертация ишида қаралаётган масалада, уч қатламли пластинка асосий тебраниш тенгламалари профессорлар Г.И.Петрашен ва И.Г.Филиппов таклиф этган усул асосида келтириб чиқарилган. Ушбу бўлим доирасида кўрсатилган тенгламаларни ишлаб чиқишда ишлатиладиган асосий ғоялар ва ёндашувлар батафсил ёритилган. Бундан ташқари диссертацияда иш билан боғлиқ бўлган мақолалар билан биргаликда ўзбек олимларининг хусусан академик Т.Р.Рашидов, Т.Ш.Ширинкулов, М.Мирсаидов ва профессор К.С.Султанов, Т.Мавлонов, А.Б.Ахмедов ва бошқалар ишлари батафсил ўрганиб чиқилди ва таҳлил қилинди.

Муҳандислик конструкциялари кўп қатламли элементлари тебранишларига оид катта миқдордаги адабиётлар манбалари таҳлил қилинди. Натижада, кўп қатламли муҳандислик элементлари назарияси кўплаб муаммолари хусусан, уч қатламли ва кўп қатламли пластинка ва қобиқлар назариялари етарлича ривожланмаганлиги қайд этилди. Уч қатламли пластинкалар динамикасини ҳисоблаш усулларини янада ривожлантириш ва такомиллаштириш, шунингдек уларнинг ностационар тебранишларига тегишли амалий масалаларни ҳал қилиш керак деган хулосалар чиқарилди.

1.2 параграф диссертация иши доирасида тадқиқ қилинаётган уч қатламли пластинканинг тебранишлари умумий масаласи ва уни ечиш усулига бағишланган. Чексиз ўлчамдаги қовушоқ-эластик уч қатламли пластинка қаралган. Қаралаётган пластинка уч ўлчовли жисм деб қаралади. Пластинка қатламлари бир хил тузилмали ва бир хил геометрияли қовушоқ-эластик материалдан тайёрланган бўлиб юқори ва қуйи қатламлар геометрик ва физик чизиқли шартларда ҳар хил калинликларга эга бўлиб, текисликда чекланмаган қатламлар орасидаги туташ чегаралар текис ва ҳар хил контакт таьсир шартларида берилади (1-расм). Бунда пастки ва юқори қатламлар «ташувчи қатламлар» деб номланади.



1 Расм. Уч қатламли пластинка элементи

Пластинкани тўғри бурчакли $Oxyz$ декарт координаталари системасида қараймиз (1-расм). Пластинка қатламларини 1-расмдагидек номерлаймиз яъни юқори ташувчи қатламни биринчи қатлам, пастки ташувчи қатламни – иккинчи, ўрта қатламни ёки тўлдирувчини – нолинчи қатлам деб номлаймиз.

Биринчи, нолинчи ва иккинчи қатламлар қалинликларини h_1, $2h_0$ ва h_2 орқали белгилаймиз; λ_m, μ_m – қатламлар материали эластик ўзгармаслари яъни Ламе коэффициентлари; ρ_m – қатламлар хажмий зичликлари. Бунда «m» индекс 0,1,2 қийматларни қабул қилади. Қатламлар материали қовушоқ-эластик хоссасига эга бўлганлигидан Больцман-Вольтерра интеграл оператори қуйидагича ҳисобланади

$$L_{1m}(\zeta)=\lambda_m\left[\zeta(t)-\int_0^t K_{1m}(t-\tau)\zeta(\tau)d\tau\right];\ M_m(\zeta)=\mu_m\left[\zeta(t)-\int_0^t K_{2m}(t-\tau)\zeta(\tau)d\tau\right]. \qquad (1)$$

бу ерда $K_{1m}(\tau), K_{2m}(\tau)$ – қатламлар материалининг хоссасидан боғлиқ L_{1m} ва M_m $(m=0,1,2)$, қовушоқ – эластик операторлари ядролари. Бунда L_{1m} ва M_m $(m=0,1,2)$ операторлар тескариланувчан, $K_{1m}(\xi)$ ва $K_{2m}(\xi)$ ядролар эса ихтиёрий деб фараз қиламиз.

Пластинка қатламлари нуқталари кучланишлари $\sigma_{ij}^{(m)}\ (i, j=1,2,3;\ m=0,1,2)$ ва деформацияси $\varepsilon_{ij}^{(m)}\ (i, j=1,2,3;\ m=0,1,2)$ орасидаги боғланишлар чизиқли операторда Больцман интеграллари қатнашган ҳолда қуйидагича ёзилади:

$$\begin{aligned} &\sigma_{ii}^{(m)} = L_{1m}\left(\varepsilon^{(m)}\right)+2M_m\left(\varepsilon_{ii}^{(m)}\right); \qquad (i=1,2,3), \\ &\sigma_{ij}^{(m)} = M_m\left(\varepsilon_{ij}^{(m)}\right); \qquad (i, j=1,2,3;\ i\neq j), \end{aligned} \qquad \varepsilon^{(m)}=\varepsilon_{11}^{(m)}+\varepsilon_{22}^{(m)}+\varepsilon_{33}^{(m)};\ (m=0,1,2). \tag{2}$$

$0x^1x^2x^3$ декарт координаталар системасида пластинка қатламлари нуқталари ҳаракатини тавсифлаш учун ҳаракат тенгламасини қуйидагича қабул қиламиз

$$\sigma_{ij,j}^{(m)} = \rho_m \frac{\partial^2 \vec{U}^{(m)}}{\partial t^2}; \quad (m=0,1,2), \tag{3}$$

бу ерда $\vec{U}^{(m)}$- қатлам нуқталари кўчиш вектори; t-вақт. φ_m скаляр ва $\vec{\psi}_m$ вектор потенциалларини қуйидаги формула билан киритамиз

$$\vec{U}^{(m)} = grad\varphi_m + rot\vec{\psi}_m, \tag{4}$$

$$\vec{U}^{(m)} = \vec{U}\left(U^{(m)}, V^{(m)}, W^{(m)}\right);\ \ \vec{\psi}_m = \vec{\psi}\left(\psi_{1m}, \psi_{2m}, \psi_{3m}\right);\ (m=0,1,2)$$

Бунда $\vec{\psi}_m$ вектор потенциали вектор майдоннинг қуйидаги соленоидлик шартини қаноатлантириши керак

$$div\vec{\psi}_m = 0, \quad (m=0,1,2) \tag{5}$$

(3) системага (4) ни қўйиб φ_m бўйлама ва $\vec{\psi}_m$ кўндаланг тўлқин потенциали учун қовушоқ-эластик қатламли пластинка ҳаракат тенгламаларини тўлқин тенгламалари кўринишида осонгина оламиз

$$L_m(\Delta\varphi_m) = \rho_m \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial t^2}; \quad M_m(\Delta\vec{\psi}_m) = \rho_m \frac{\partial^2 \vec{\psi}_m}{\partial t^2}; \quad (m=0,1,2), \tag{6}$$

бу ерда қуйидаги белгилашларни киритамиз

$$L_m = L_{1m} + 2M_m; \qquad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Кўчиш вектори, деформация ва кучланиш тензори компоненталари φ_m ва ψ_m $(m=0,1,2)$. потенциаллар орқали ифодаланади.

$t<0$ да пластинка тинч ҳолатда бўлган, $t=0$ пайтда унинг чегаравий сиртларига (ташувчи қатламлар сиртларига) $z=\pm h_i^*$; $h_i^* = h_0 + h_i$, $(i=1,2)$ да динамик таъсир бошланган деб хисоблаймиз.

$$\sigma_{xz}^{(i)}(x,y,z,t)\Big|_{z=\pm h_i^*} = \pm F_{xz}^{(i)}(x,y,t); \quad \sigma_{yz}^{(i)}(x,y,z,t)\Big|_{z=h_i^*} = \pm F_{yz}^{(i)}(x,y,t);$$

$$\sigma_{zz}^{(i)}(x,y,z,t)\Big|_{z=\pm h_i^*} = \pm F_z^{(i)}(x,y,t), \quad (i=1,2). \tag{7}$$

$t<0$ да пластинка тинч деб фараз қиламиз шунинг учун барча қатламлар ҳам тинч ва бундан $t=0$ да бошланғич шартлар нолга тенг деб ҳисоблаймиз

$$\varphi_m = \psi_{km} = \frac{\partial \varphi_m}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_{1m}}{\partial t} = 0, \ (m=0,1,2). \tag{8}$$

(7) чегаравий шартдан ташқари пастки ва юқори ташувчи қатламлар билан тўлдирувчи контакт сиртларида қуйидаги динамик ва кинематик контакт шартлар бажарилиши керак:

а) юқори ташувчи қатлам ва тўлдирувчи орасидаги контакт сиртда $z = h_0$ да:

$$\sigma_{zz}^{(0)} = \sigma_{zz}^{(1)};\ \sigma_{xz}^{(0)} = \sigma_{xz}^{(1)};\ \sigma_{yz}^{(0)} = \sigma_{yz}^{(1)};\ U_0 = U_1;\ V_0 = V_1;\ W_0 = W_1. \qquad (9)$$

б) пастки ташувчи қатлам ва тўлдирувчи орасидаги контакт сиртда яъни $z = -h_0$ да:

$$\sigma_{zz}^{(0)} = \sigma_{zz}^{(2)};\ \sigma_{xz}^{(0)} = \sigma_{xz}^{(2)};\ \sigma_{yz}^{(0)} = \sigma_{yz}^{(2)};\ U_0 = U_2;\ V_0 = V_2;\ W_0 = W_2. \qquad (10)$$

$t = 0$ да (8) потенциаллар учун бошланғич шартдан U_m, V_m, W_m $(m = 0,1,2)$ кўчишлар учун қуйидаги бошланғич шартларни оламиз:

$$U_m = V_m = W_m = 0\,; \qquad \frac{\partial U_m}{\partial t} = \frac{\partial V_m}{\partial t} = \frac{\partial W_m}{\partial t} = 0\,. \qquad (11)$$

Шундай қилиб пластинка ностационар тебранишлари масаласининг умумий қўйилишида масалани ечиш учун ҳар бир қатламда тўрттадан (масалан, $\varphi_0, \psi_{10}, \psi_{20}, \psi_{30}$ нолинчи ёки тўлдирувчи қатлам учун аниқланадиган функциялар) – (6) тенгламани (7) чегаравий ва (9), (10) контакт ва (8) ёки (11) нол бошланғич шартларда ечиш керак.

Бу параграф доирасида масалани умумий ечиш усули берилиб қуйида уч қатламли пластинканинг симметрик тебранишлари масаласини ечишда ишлатилади.

1.3 параграфда уч қатламли пластинка тебранишлари амалий масаласи учта гурухга ажратилган:

1^0. Биринчи гурухга тузулиши кучланиш таъсири йўналишидан ҳамда уларнинг қийматидан боғлиқ масалалар киради (йўқ ёки нолга тенг кучланишлардан фарқли). Бунга пластинка тебранишининг икки кўриниши симметрик ва антисимметрик тебранишлари тегишли.

2^0. Иккинчи гурухга пластинка қатламлари орасидаги контакт турлича шартлар билан берилган пластинкалар тебранишлари масаласи тегишли. Бунда шундай уч турдаги масалалар қаралади: 1) бикр контакт; 2)идеал контакт; 3) Кулон қонуни бўйича ишқаланиб силжиш

3^0. Учинчи гурухга пластинка четлари турли шартлар билан берилган масалалар тегишли. Бундай ҳолда пластинка четлари маҳкамланишидан боғлиқ турли чегаравий шартлар тузиш мумкин. Диссертацияда тўртта шундай адабиёт манбаларида келтирилган пластинка тебранишлари чегаравий масаласи қўйилган хусусан: 1) пластинка тўртала чети ҳам бикр маҳкамланган; 2) пластинка тўртала чети ҳам шарнирли маҳкамланган; 3) пластинка тўртала чети ҳам эркин таянган; 4) Юқоридаги ҳоллар турли комбинацияда олинган. Масалан, пластинка икки чети шарнирли маҳкамланган, бошқа иккиси эркин таянган; икки чети шарнирли маҳкамланган, бошқа иккиси қистириб маҳкамланган, ва ҳ.к.

Диссертациянинг **«Уч қатламли қовушоқ-эластик пластинка ностационар симметрик тебранишлари»** деб номланган иккинчи боби уч қатламли қовушоқ-эластик пластинканинг ностационар тебранишлари назариясини аниқ ечимлар усули бўйича ишлаб чиқишга бағишланган бўлиб, бунда юқорида кўрсатилган камчиликлардан ҳоли ва текис масала қаралган. Ташувчи қатлам ва тўлдирувчи орасидаги контакт бикр деб ҳисобланади.

2.1 параграф уч қатламли қовушоқ – эластик пластинка симметрик тебранишлари умумий тенгламаларини келтириб чиқаришга бағишланган. Масаланинг умумий қўйилиши юқорида 1.2 бўлимда уч ўлчовли ҳолда келтирилган. Пластинканинг ўлчамлари чекланмаганлигини ҳисобга олиб қуйида бу тенгламалар тўғри тўртбурчакли Oxz декарт координаталар системасида (1-расм).

Текис деформация ҳолида қатлам нуқталари кўчиш векторлари қуйидагича

$$\vec{U}^m = U_m \cdot \vec{i} + W_m \cdot \vec{k}\,; \quad U_m = U_m(x,z,t)\,; \qquad W_m = W_m(x,z,t), \tag{12}$$

бу ерда $\vec{i}$, $\vec{k}$ – координата ўқининг бирлик орталари, (4) да қуйидагича оламиз

$$\varphi_m = \varphi_m(x,z,t); \qquad \vec{\psi}_m = \psi_m(x,z,t)\vec{j} \tag{13}$$

бу ерда $\vec{j}$ – $Oy,$ ўқи бирлик ортаси, пластинка қатламлари нуқталарининг ҳаракат тенгламалари (6) даги ўн иккита оддий дифференциал тенгламалардан $\varphi_m(x,z,t)$ ва $\psi_m(x,z,t)$ потенциал функцияларга нисбатан олтита тўлқин тенгламаларига келтирилади. Бунда Лаплас операторининг кўриниши қуйидагича

$$\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial z^2\,. \tag{14}$$

Белгилашлардан, $\vec{\psi}_m$ вектор майдон соленоидлик шарти (5) автоматик ҳолда (13) кўринишга ўтади.

Энди пластинка қатламларидаги кўчиш вектори компоненталарини, ҳамда деформация ва кучланишлар тензорини киритилган (3) потенциал функциялар орқали осонгина ифодалаймиз. Масалан

$$U_m = \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} - \frac{\partial\psi_m}{\partial z}; \;\; \varepsilon_{xx}^{(m)} = \frac{\partial^2\varphi_m}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\psi_m}{\partial x\partial z};\; ....(m = 0,1,2). \tag{15}$$

Қовушоқ-эластиклик чизиқли назариясига кўра (12) кўчишлар майдонини кўрсатилганидек қуйидаги кўринишда симметрик ва антисимметрик қисмларга ажратиб тасвирлаш мумкин

$$\vec{U}_m = \vec{U}_m^s + \vec{U}_m^a, \tag{16}$$

бу ерда $\vec{U}_m^s$-пластинка қатламлари кўчишлар майдонининг симметрик (бўйлама), $\vec{U}_m^a$-антисимметрик (эгилишдаги) қисмлари. Бунда (16) йиғинди майдон (7) чегаравий шартни қаноатлантиради, унинг симметрик қисми (7) шартни қаноатлантириши керак

$$f_x^{(1)}(x,t) = -f_x^{(2)}(x,t) = \frac{1}{2}\left(F_x^{(1)} + F_x^{(2)}\right); \;\; f_z^{(1)}(x,t) = f_z^{(2)}(x,t) = \frac{1}{2}\left(F_z^{(1)} + F_z^{(2)}\right). \tag{17}$$

яъни масаланинг (7) чегаравий шарти қуйидаги кўринишда

$$\begin{aligned} &\sigma_{xz}^{(i)}(x,z,t)\Big|_{z=(-1)^{i-1}h_i^*} = f_x^{\,i}(x,t); \qquad \sigma_{zz}^{(i)}(x,z,t)\Big|_{z=(-1)^{i-1}h_i^*} = f_z^{\,i}(x,t); \\ &\sigma_{yz}^{(i)}(x,z,t)\Big|_{z=(-1)^{i-1}h_i^*} = 0; \quad h_i^* = h_0 + h_i, (i = 1,2) \end{aligned} \tag{18}$$

Бундан ташқари тўлдирувчининг $z=\pm h_0$ сиртида динамик ва кинематик котакт шартлар қуйидагича

$$\sigma_{zz}^{(0)}(x,z,t)\Big|_{z=\pm h_0}=\begin{cases}\sigma_{zz}^{(1)}(x,z,t)\Big|_{z=h_0},\\ \sigma_{zz}^{(2)}(x,z,t)\Big|_{z=-h_0};\end{cases}\qquad \sigma_{xz}^{(0)}(x,z,t)\Big|_{z=\pm h_0}=\begin{cases}\sigma_{xz}^{(1)}(x,z,t)\Big|_{z=h_0},\\ \sigma_{xz}^{(2)}(x,z,t)\Big|_{z=-h_0};\end{cases}\qquad (19)$$

$$\sigma_{yz}^{(0)}(x,z,t)\Big|_{z=\pm h_0}=0,$$

ва

$$U_0(x,z,t)\Big|_{z=\pm h_0}=\begin{cases}U_1(x,z,t)\Big|_{z=h_0};\\ U_2(x,z,t)\Big|_{z=-h_0},\end{cases} W_0(x,z,t)\Big|_{z=\pm h_0}=\begin{cases}W_1(x,z,t)\Big|_{z=h_0};\\ W_2(x,z,t)\Big|_{z=-h_0}.\end{cases}\qquad (20)$$

$t=0$ да бошланғич шартлар нолга тенг деб ҳисобланади

$$\varphi_m=\psi_m=0,\ \frac{\partial\varphi_m}{\partial t}=\frac{\partial\psi_m}{\partial t}=0.\qquad (21)$$

Шундай қилиб, уч қатламли пластинканинг ностационар тебранишлари масаласини ечиш олтита иккинчи тартибли (6) интегро-дифференциал тенгламаларни ўн иккита (18)- (20) чегаравий ва контакт шартлар ҳамда нолга тенг (21) бошланғич шартларда ечишга тўғри келади.

Қўйилган масалани ечиш учун ташқи таъсир функциялари яъни $f_x^{(1,2)}(x,t)$ ва $f_z^{(1,2)}(x,t)$ нинг (17) кўринишини қуйидагича тасвирлаймиз

$$f_x^{(1,2)}(x,t)=\int_0^\infty\left.\begin{matrix}\cos kx\\ \sin kx\end{matrix}\right\}dk\int_{(l)}\tilde f_x^{(1,2)}(k,p)e^{pt}dp;\quad f_z^{(1,2)}(x,t)=\int_0^\infty\left.\begin{matrix}\sin kx\\ -\cos kx\end{matrix}\right\}dk\int_{(l)}\tilde f_z^{(1,2)}(k,p)e^{pt}dp,\qquad (22)$$

бу ерда $\tilde f_x^{(i)}(k,p)$, ва $\tilde f_z^{(i)}(k,p)$, $(i=1{,}2)$ – $\operatorname{Re}p>0$ регуляр функциялар. Бу функциялар чекли сондаги қутбларга эга, $(-i\omega_0,\, i\omega_0)$ мавҳум ўқни ўз ичига олувчи ва жуда этиборга олмаслик даражада кичик $k>k_0$ учун $\Omega(k,p)$ бирор соҳанинг ичида ихтиёрий қийматни қабул қилади. (l)– контур (Р) комплекс соҳада $\operatorname{Re}p=\nu>0$ k бўйича ўзидан ўнг тарафдаги $\Omega(k,p)$ қолган қисми.

Ушбу қабул қилинган фаразларга таяниб ташқи таъсир функциялари учун (6), (18)- (20) ва (21) масаланинг ечимини (22) кўринишда излаймиз натижада (6) тенгламадан потенциал функцияларга нисбатан оддий дифференциал тенгламаларга келамиз. Ҳосил бўлган тенгламаларнинг умумий ечимлари қуйидагича бўлади

$$\begin{aligned}\tilde\varphi_m(z,k,p)&=A_1^{(m)}(k,p)ch\alpha_m z+A_2^{(m)}(k,p)sh\alpha_m z;\\ \tilde\psi_m(z,k,p)&=B_1^{(m)}(k,p)sh\beta_m z+B_2^{(m)}(k,p)ch\beta_m z;\ (m=0{,}1{,}2),\end{aligned}\qquad (23)$$

бу ерда

$$\begin{aligned}&\alpha_m^2=k^2+\rho_m p^2\tilde L_m^{-1}; && \beta_m^2=k^2+\rho_m p^2\tilde M_m^{-1};\\ &\tilde L_m=(\lambda_m+2\mu_m)\left[1-\tilde K_{1m}(p)\right]; && \tilde M_m=\mu_m\left[1-\tilde K_{2m}(p)\right];\end{aligned}\qquad (24)$$

$$\tilde K_{im}(p)=\int_0^\infty K_{im}(\tau)e^{-pt}dt;\qquad \arg\alpha=\arg\beta=0,\ \rho>0 \text{ да.}$$

(17) га мос симметрик таъсирлар ҳолида,

$$f_x^{(2)}=-f_x^{(1)}\quad \text{ва}\quad f_z^{(2)}=f_z^{(1)}$$

(23) дан қуйидаги келиб чиқади

$$A_2^{(m)}=0,\qquad B_2^{(m)}=0,\qquad (m=0,1,2).$$

Бундан (6) тенгламанинг ечими пластинка симметрик тебранишлари ҳолида қуйидагича

$$\tilde{\varphi}_m(z,k,p)=A_1^{(m)}(k,p)ch\alpha_m z;\quad \tilde{\psi}_m(z,k,p)=B_1^{(m)}(k,p)sh\beta_m z,\quad (m=0,1,2).\quad (25)$$

U_m ва W_m кўчишларни ҳам (22) кўринишида тасвирлаймиз. Буларни кўчишларнинг (15) ифодасига қўйиб $\tilde{U}_m$ ва $\tilde{W}_m$ алмаштирилган кўчишлар учун формулаларни оламиз. Олинган ифодада гиперболик функцияларнинг даражали қаторларга стандарт ёйилмаларидан фойдаланиб қуйидагини оламиз

$$\tilde{U}_m=\sum_{n=0}^{\infty}\left[k\alpha_m^{2n}\cdot A_1^{(m)}-\beta_m^{2n+1}B_1^{(m)}\right]\frac{z^{2n}}{(2n)!};\ \tilde{W}_m=\sum_{n=0}^{\infty}\left[\alpha_m^{2n+2}\cdot A_1^{(m)}-k\beta_m^{2n+1}B_1^{(m)}\right]\frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!}.\qquad (26)$$

Уч қатламли пластинканинг тебраниш тенгламаларидаги изланувчи функциялар сифатида нолинчи қатламнинг шундай сирти нуқтасининг алмаштирилган $\tilde{U}_0$ ва $\tilde{W}_0$ кўчишларнинг бош қисмларини қабул қиламизки бу сиртнинг ўзи $z=0$ текисликдан қуйидаги формула билан аниқланувчи масофада ётади

$$\xi=\chi\cdot h_0,\qquad -1\le\chi<0;\quad 0\le\chi<1\qquad (27)$$

бу ерда χ -ўзгармас сон $-1\le\chi\le1$ тенгсизликни қаноатлантиради. Бунинг учун (26) тенгламада $z=\xi,\ m=0$ ва $n=0$ деб қабул қиламиз. У холда $\tilde{U}_0^{(0)}$ ва $\tilde{W}_0^{(0)}$ белгилашларни киритиб қуйидагини оламиз

$$A_1^{(0)}=\frac{\frac{1}{\xi}\tilde{W}_0^{(0)}-k\tilde{U}_0^{(0)}}{\alpha_0^2-k^2};\quad \beta_0B_1^{(0)}=\frac{\frac{k}{\xi}\tilde{W}_0^{(0)}-\alpha_0^2\tilde{U}_0^{(0)}}{\alpha_0^2-k^2}.\qquad (28)$$

Сўнгра кўчишлар ва кучланишларни киритилган $\tilde{U}_0^{(0)}$ ва $\tilde{W}_0^{(0)}$ функциялар орқали ифодалаб чегаравий ва контакт шартларда қуйидаги уч қатламли қовушоқ-эластик пластинка симметрик тебранишлари тенгламаларини оламиз

$$\left\{c_{11}\frac{\partial^4}{\partial t^4}+c_{12}\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial t^2}+c_{13}\frac{\partial^4}{\partial x^4}+c_{14}\frac{\partial^2}{\partial t^2}+c_{15}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+c_{16}\right\}\frac{\partial}{\partial x}W_0^{(0)}(x,t)+$$
$$+\left\{d_{11}\frac{\partial^4}{\partial t^4}+d_{12}\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial t^2}+d_{13}\frac{\partial^4}{\partial x^4}+d_{14}\frac{\partial^2}{\partial t^2}+d_{15}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right\}U_0^{(0)}(x,t)=$$
$$=\left\{s_{11}\frac{\partial^4}{\partial t^4}+s_{12}\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial t^2}+s_{13}\frac{\partial^4}{\partial x^4}+s_{14}\frac{\partial^2}{\partial t^2}+s_{15}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+s_{16}\right\}f_x^{(1)}(x,t);\qquad (29)$$
$$\left\{c_{21}\frac{\partial^4}{\partial t^4}+c_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial t^2}+c_{23}\frac{\partial^4}{\partial x^4}+c_{24}\frac{\partial^2}{\partial t^2}+c_{25}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+c_{26}\right\}W_0^{(0)}(x,t)+$$
$$+\left\{d_{21}\frac{\partial^4}{\partial t^4}+d_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial t^2}+d_{23}\frac{\partial^4}{\partial x^4}+d_{24}\frac{\partial^2}{\partial t^2}+d_{25}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+d_{26}\right\}\frac{\partial}{\partial x}U_0^{(0)}(x,t)=$$
$$=\left\{s_{21}\frac{\partial^4}{\partial t^4}+s_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^2\partial t^2}+s_{23}\frac{\partial^4}{\partial x^4}+s_{24}\frac{\partial^2}{\partial t^2}+s_{25}\frac{\partial^2}{\partial x^2}+s_{26}\right\}f_z^{(2)}(x,t),$$

бу ерда c_{ij}, d_{ij}, s_{ij} коэффициенлар турли формулалардан аниқланади

$$c_{11} = -\frac{1}{\xi}\left[\left(q_0\rho_1 M_1^{-1} + (1-q_1)\rho_0 L_0^{-1}\right)\rho_1 L_1^{-1}\frac{(h_0+h_1)h_0^4}{12} + \left(\left(2q_1\rho_0 M_0^{-1} + 3(1+q_1-q_0q_1)\rho_1 M_1^{-1} + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + 2q_0q_1\rho_0 L_0^{-1}\right)\rho_1 L_1^{-1} + \left(\left(1+q_1\right)\rho_0 M_0^{-1} + (1+q_1)q_0\rho_0 L_0^{-1}\right)\rho_1 M_1^{-1} + 3q_0(1-q_1)\rho_1 L_1^{-1}\rho_1 L_1^{-1}\right)\frac{(h_0+h_1)^3 h_0^2}{36}\right];$$

\- -

Олинган тенгламалар гиперболик типдаги хусусий ҳосилали тенгламалардир. Бу пластинканинг ностационар тебранишлари жараёнларини тўғри тавсифлаш учун муҳим аҳамиятга эга. Бундан ташқари ушбу тенгламалар айланиш инерциясини ва кўндаланг силжиш деформациясини хисобга олувчи ҳадларга эга. Бундан шундай хулоса келиб чиқадики ҳосил қилинган тенгламалар С.П.Тимошенко типидаги тенгламаларга умумийроқ. Бунда шуни таькидлаш лозимки бу тенгламалар Кирхгоффнинг классик тенгламалари ва Тимошенко тенгламаларидан фарқли равишда чиқарилган бўлиб бунда қўшимча гипотезалар ва аксиомалар ҳамда суний киритиладиган тўғриловчи коэффициентларсиз чиқарилган.

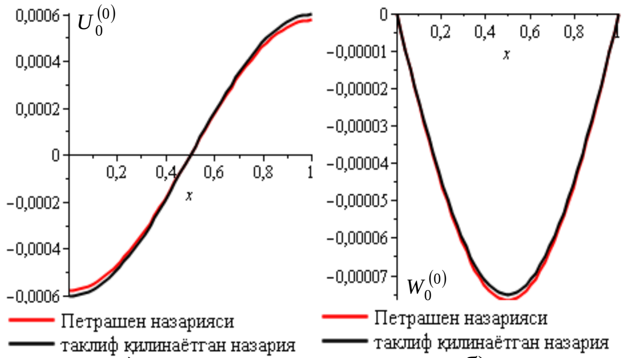
2.2 параграфда қовушоқ-эластик пластинка симметрик тебранишларида кучланган-деформацияланган ҳолати (КДҲ)ни аниқлаш учун формулалар киритилган. (25) умумий ечим орқали ифодаланган барча $U_0^{(0)}(x,t)$, $W_0^{(0)}(x,t)$ кўчишлар ва кучланиш тензори $\sigma_{xx}^{(m)}$, $\sigma_{zz}^{(m)}$, $\sigma_{xz}^{(m)}$, $(m = 0,1,2)$ компонента-ларидан қовушоқ-эластик уч қатламли пластинка кучланган-деформацияланган ҳолатини хисоблаш алгоритми тузилган.

Ушбу вазифа пластинка ўрта қатлами учун алоҳида ташувчи қатлами учун алоҳида бажарилган. U_0 ва W_0 кўчишлар ва $\sigma_{xx}^{(0)}$, $\sigma_{zz}^{(0)}$, $\sigma_{xz}^{(0)}$ кучланиш компоненталари $U_0^{(0)}(x,t)$, $W_0^{(0)}(x,t)$ изланувчи функциялар орқали ифодаланган бўлиб, бу функциялар уч қатламли пластинканинг ўрта қатламидан координата текислигининг Oz ўқи йўналишида ξ масофада жойлашган сирт нуқталарининг бўйлама ва кўндаланг кўчишлари бош қисми. Кейин эса ташувчи қатламнинг ихтиёрий кесимидан берилган аниқлик билан КДҲ параметрларини аниқлаш имкониятини берувчи аналитик формулалар чиқарилган.

2.3 параграф уч қатлмли қовушоқ-эластик пластинканинг умумий симметрик тебранишлари тенгламаларидан келиб чиқадиган хусусий ва лимитик холларнинг ва буларга мос КДҲ ни аниқлаш учун формулаларни тахлил қилишга бағишланган. Дастлаб уч қатламли қовушоқ-эластик пластинканинг келтириб чиқарилган тебраниш тенгламалари С.Г.Лехницкий, С.А.Амбарцумян, Е.Рейсснер назарияларининг маьлум бўлган тенгламалари билан таққосланиб уларга нисбатан умумийроқ эканлиги исботланган.

Сўнгра (29) тенгламалар системасидан уч қатламли эластик пластинканинг симметрик тебранишлари тенгламалари хусусий ҳол сифатида чиқарилган. Кейинчалик бошқа авторларнинг тенгламалари билан таққослаш учун ва соддалаштириш учун икки қатламли ва бир қатламли (бир жинсли) пластинкалар тебраниш тенгламаларини қарашда эластик пластинка тенгламаларидан фойдаланилган.

Бошқа муаллифларнинг натижалари билан таққослаш мақсадида икки қатламли ва бир жинсли пластинкаларнинг тенгламалари чиқарилган. Бир жинсли пластинка холида натижалар Г.И.Петрашен ва Э.В.Хинен натижалари билан таққосланганда ҳар иккала назария бўйича тенгламаларнинг кўриниши тузилиши жиҳатидан мос аммо баъзи коэффициентлари қиймат-лари билан фарқ қилиши кўрса-тилган.



а) б)

2-расм. Бўйлама кўчиш U нинг ва кўндаланг кўчиш W нинг $t = 0.6$ да турли назариялар бўйича таққосланиши; $0 \le x \le 1$

2.4 параграфда бу назариялар бўйича кўчишларнинг сонли ҳисоби (2-а) ва б) расм) деярли мос тушиши кўрсатилиб олинган натижаларнинг ишончлилиги исботланган.

Диссертациянинг **«Четлари турлича маҳкамланган уч қатламли пластинка симметрик тебранишлари»** деб номланган учинчи боби ташқи юкланишлар таъсири остида жойлашган уч қатламли эластик пластинка симметрик тебранишлари амалий масаласини аниқ сонли ечишга бағишланган.

3.1 параграфда чексиз узунликдаги ва l кенгликдаги уч қатламли эластик пластинка симметрик тебранишлари текис масаласи ечилган. Пластинка четлари шарнирли маҳкамланган деб ҳисоблаймиз. Пластинканинг четки текисликлари $z = \pm(h_0 + h_i),\ i = 1{,}2$ да $f_x^{(1)}(x,t) = f_x(x,t)$ ва $f_z^{(1)}(x,t) = f_z^{(2)}(x,t) = f_z(x,t)$ (17) кучлар билан қўзғалишлар берилган бўлиб пластинка симметрик тебранади деб ҳисоблаймиз. Масалани ечиш методикасини ишлаб чиқишда бу функциялар ихтиёрий ва юқорида қабул қилинган шартларни қаноатлантиради деб қабул қиламиз (формула (22)).

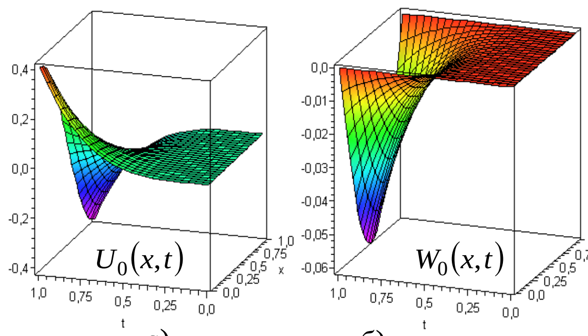
$f_x(x,t)$ ва $f_z(x,t)$ аниқ кўринишлари масалани сонли ечишда берилади. Ушбу масала иккинчи бобда ишлаб чиқилган пластинка тебранишлари тақрибий тенгламалари ва пластинканинг кесимларида КДҲ аниқлаш алгоритми асосида ечилган. Пластинка қатламлари материалларининг берилган геометрик ва физик-механик параметрлари қийматлари учун «Maple» математик пакети ёрдамида изланаётган миқдорларнинг сон қиймати аниқланган.

Пластинканинг $x = 0{,}5$ ўрта кесимидан чап томонда жойлашган пластинка кесими нуқталари кўчишлари мусбат эканлиги яьни пластинканинг чап ярми бўйлама толаларининг чўзилишга ишлаётганлиги исботланган. Бошқа тарафдан эса худди шу вакт моментида пластинканинг $x = 0{,}5$ ўрта кесимидан ўнг томонда жойлашган пластинка кесими нуқталарида манфий кўчишлар кузатилди яьни пластинканинг ўнг бўйлама толалари сиқилишга ишлаётгани кўрсатилган

Шуни таькидлаш лозимки пластинка ўрта кесимининг хар хил тарафларида бундай икки хил ҳолат ечилаётган масалани физик маъносига тўла мос келади. Бундан ташқари пластинканинг нуқталаридаги қиймати жуда кичик даражада бўлган кўндаланг кўчишлар хам кузатилади. Бундай кўчишларнинг пайдо бўлиши бўйлама ташқи юкларнинг пластинка ташқи сиртларига таъсири натижасидир. Бунда олинган натижалар уч қатламли пластинканинг симметрик тебранишларини ҳисоблашда пластинка нуқталарининг кўндаланг кўчишларини ҳисобга олмаса ҳам бўлади деган хулоса қилиш имконини беради.

3.2 параграф олдинги қисмнинг мантиқий давоми бўлиб «Четлари шарнирли маҳкамланган уч қатламли пластинка кучланган-деформацияланган ҳолати» деб номланиб пластинка ўрта ва ташувчи қатламлари кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини сонли таҳлил қилишга бағишланган. Иккинчи бобда таклиф қилинган пластинка қатламлари КДҲ аниқлаш алгоритмига биноан ўрта қатламнинг нуқталари бўйлама ва кўндаланг кўчишлари ҳисобланади. Олинган натижалар расмларда уч ўлчовли ва кўчиш ва кучланишларнинг координатага ва вақтга боғлиқ графиклари кўриниши тасвирланган.

3-а), б) расмда ўрта қатлам (тўлдирувчи) нинг нуқталаридаги $U_0(x,t)$ бўйлама ва $W_0(x,t)$ кўндаланг кўчишларнинг графиклари тасвирланган. Булардан келиб чиқадики қатламнинг U_0 бўйлама W_0 кўндаланг кўчишлари амплитудаси вақтнинг дастлабки қийматларида жуда кичик, кейин эса вақт ўтиши билан қатлам кўчишлари амплитудасининг абсолют қийматлари ўсиб боради.



а) б)

3-Расм. Ўрта қатлам кўчишлари $U_0(x,t)$ ва $W_0(x,t)$ нинг вақтга ва координатага боғлиқ ўзгариш графиклари.

Таққослаш натижаларидан шундай хулоса чиқариш мумкинки, пластинканинг ташувчи қатлами кучланганлик-деформацияланган ҳолати сонли таҳлил қилинган. Юқоридаги натижаларга ўхшаш натижалар қуйи ташувчи қатлам учун ҳам ўринли. Олинган натижаларнинг ишончлилигини текшириш учун ташувчи қатлам ва тўлдирувчи қатламнинг туташ сиртидаги бир хил нуқталарида бўйлама кўчиш ва бўйлама нормал кучланишнинг формулалари бўйича вақтдан боғлиқ ҳисоблашлар бажарилди. Ҳисоб натижалари бўйича ҳам кўчишлар ҳам кучланишлар деярли идеал мос келади.

3.3 параграфда икки чети қистириб маҳкамланган уч қатламли пластинка симметрик тебранишлари масаласи ечилган. Олинган натижалар уч ўлчовли ва кўчиш ва кучланишларнинг координатага ва вақтга боғлиқ графиклари кўриниши расмда келтирилган. Таққослаш натижаларидан шундай хулоса чиқариш мумкинки, пластинканинг ташувчи қатламлари тўлдирувчи қатламга нисбатан кўпроқ деформацияланади. Бунда мос нуқталардаги кўчишлар қийматлари бир биридан 1,5 марта ва ундан кўп фарқ қилади. Худди шундай пластинка ташувчи қатламларига таъсир қилувчи кучланишларнинг қийматлари ўрта қатламга (тўлдирувчи) таъсир этаётган кучланишлар қийматларига нисбатан 1,5 марта ва ундан катта фарқ қилади.

3.4 параграф «Уч қатламли пластинка КДҲ га материал хоссасининг таъсири деб номланган. Унда материал хоссасининг таъсирини аниқлаш ва баҳолаш учун четлари шарнирли маҳкамланган уч қатламли пластинканинг КДҲ аниқлаш масаласи қаралган. Бунда ўртадаги қатламнинг хоссалари ўзгармасдан қолади, ташувчи қатламлар хоссалари ишлатиладиган материал турига мувофиқ қабул қилинади. Масаланинг қўйилиши, ечиш алгоритми ва уни амалга ошириш усули ушбу бобнинг биринчи параграфида келтирилган. Олинган натижалар бўйича тегишли хулосалар чиқарилди.

ХУЛОСА

«Уч қатламли композит пластинканинг ностационар тебранишлари» мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги асосий хулосалар келиб чиқади:

1. Гипотеза ва аксиомаларсиз уч қатламли қовушоқ-эластик пластинка ностационар симметрик тебранишлари текис масаласи назарияси ишлаб чиқилди.

2. Уч қатламли қовушоқ-эластик пластинка ностационар симметрик тебранишлари текис масаласи умумий тебраниш тенгламаларидан хусусий ҳолда уч қатламли эластик пластинка, икки қатламли қовушоқ-эластик ва эластик пластинка, бир қатламли эластик ва қовушоқ-эластик пластинка тебранишлари тенгламалари олинган.

3. Қовушоқ-эластик пластинка симметрик тебранишлари умумий тенгламаларидан хусусий ҳолда муҳандислик амалиёти учун яроқли С.П.Тимошенко типидаги аниқлаштирилган тенгламалар ҳамда тартиби иккидан катта бўлмаган классик типдаги тенгламаларни олиш мумкин.

4. Келтириб чиқарилган уч қатламли пластинка тебраниш тенгламалари асосида вақтдан боғлиқ ҳолда ўзгарувчи юкланиш таьсири остидаги уч қатламли пластинканинг тебранишлари учун янги масалалар келтирилган;

5. Ташқи юкланишлар таьсири остида чегаравий шартлар билан берилган уч қатламли пластинка тебранишларини ҳисоблашнинг самарали математик модели, ҳисоблаш методикаси, ҳисоблаш алгоритми ва баьзи аналитик ечимлар ишлаб чиқилган.

6. Ишлаб чиқилган усулларнинг ва олинган натижаларнинг ишончлилигини исботлаш учун бир қатор амалий масалалар ечилган бўлиб, олинган натижалар бошқа муаллифларнинг аниқ ва сонли ечимлари билан таққосланган;

7. Динамик юкланиш таьсири остидаги уч қатламли пластинканинг тебраниш тенгламалари системаси вариацион итерация усули билан сонли – аналитик ечиш алгоритми таклиф қилинган.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ DSc.30.08.2018.FM/T.02.09 ПРИ САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ХУДОЙБЕРДИЕВ ЗОКИР БОЗОРБОЕВИЧ

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛАСТИН

01.02.04 -Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Самарканд – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №B2017.3.PhD/FM135

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете и Самаркандском государственном университете.

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

Научный руководитель:	**Худойназаров Хайрулла** доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Абдикаримов Рустамхан Алимханович** доктор физика-математических наук, профессор
	Усаров Махаматали Корабоевич доктор физика-математических наук, профессор
Ведущая организация:	**Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта**

Защита диссертации состоится «29» ноября 2019 г. в 11 00 часов на заседании научного совета DSc.30.08.2018.FM/T.02.09при Самаркандском государственном университете по адресу: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел/факс (9966) 239-11-40; e-mail: sasu_info@edu.uz.

С диссертацией (PhD) можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета (регистрационный номер №100. Адрес: 140104, г.Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел/факс (9966) 239-11-40.

Автореферат диссертации разослан «14» ноября 2019 года.
(реестр протокола рассылки №1 от «14» ноября 2019 года.)

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI

Р.И.Халмурадов
Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, доктор технических наук, профессор

А.Абдирашидов
Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, доктор физика-математических наук, доцент

А.З.Хасанов
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, доктор технических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии(PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире изучение вопросов динамики слоистых конструкций имеет важное практическое значение в различных областях техники и строительства, в частности, разработке новых моделей динамического их деформирования, близких к экспериментальным, применению эффективных математических и численных методов. В последние годы в США, Японии, Франции, Китае, Российском Федерации и в других развитых странах для повышения прочности инженерных конструкций используются различные слоистые конструкции и применяются неклассические модели их расчета. Поэтому, по современным требованиям снижением весогабаритных показателей конструкций в промышленности и строительстве получение экономической выгоды, обеспечением надлежащую прочность конструкций имеет важное значение.

Во многих зарубежных странах как Россия, США, Англия, Франция, Германия, Япония и в других развитых государствах, для развития и усовершенствования методов проектирования таких отраслей, как строительство, машиностроение и кораблестроение, исследованиям динамического НДС, расчету и проблеме повышения несущей способности конструкций, находящихся под воздействием динамических нагрузок, таких как упругий удар, воздействие импульсных и подвижных нагрузок, а также ударных волн уделено особое внимание.

В мире проводятся научно-исследовательские работы, направленные на изучение нестационарного поведения многослойных конструкционных элементов, и, в частности трехслойных пластин, находящихся под действием различных динамических нагрузок. Такие элементы используются в различных инженерных конструкциях, связанные с динамической устойчивостью и прочностью конструкционных элементов, в частности, в задачах о действии ударных, импульсных и взрывных нагрузок на деформируемые трехслойные пластинки. Построение математических моделей процессов нестационарных колебаний и НДС таких элементов в аэрокосмических, подземных и подводных инженерных конструкциях, а также их численное исследование актуальны в области механики деформируемого твердого тела.

В нашей Республике в области строительства и техники, созданию моделей и алгоритмов расчета, повышению несущей способности слоистых конструкций, находящихся под действием различных динамических нагрузок и разработке мероприятий по широкому их применению в производство приковано особое внимание. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах поставлены задачи, в том числе «… модернизации производства, техническое и технологическое обновление, производства …, … поэтапное внедрение ресурсосберегающих и эффективных современных технологий …»[1]. Выполнение этих заданий, в том числе создание математических моделей изучения процессов деформирования кон-

---

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

струкций, с целю повышения несущей их способности выбором оптимальных параметров заполнителя и несущих слоев, считаются одними из важнейших задач.

Выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах» от 7 февраля 2017 года и постановлениях №ПП-3190 «О мерах по совершенствованию проведения научных исследований в области сейсмологии, сейсмостойкого строительства и сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан» от 9 августа 2017 года, №ПП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов» от 27апреля 2018 года, №ПП-3502 «О мерах по обеспечению в 2018-2022 годах генеральными планами населенных пунктов, улучшению деятельности проектных организаций, а также повышению качества подготовки специалистов в сфере градостроительства» от 2февраля 2018 года, а также в других нормативно-правовых документах, относящихся к данной сфере деятельности в определенной степени служить диссертационное исследование.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики «Ф4-математика, механика и информатика».

Степень изученности проблемы. В нашей стране и за рубежом в различных областях техники и строительства широко применяются многослойные, в частности трехслойные пластинки. При этом во многих случаях динамические расчеты пластин основываются на классические теории опирающихся на гипотезы Кирхгофа. К таким принадлежать немало работ. Дальнейшее развитие и уточнение классической теории осуществлялось С.Г.Лехницким, С.А.Амбарцумяном, Г.И.Петрашеном, И.Г.Филипповым, Х.Алтенбахом, E.Reysner, Э.И.Григолюком, В.П.Шевченко, М.В.Фоменко, Х.Х.Худойназаровым, М.Мирсаидовым, Р.И.Халмурадовым, А.Б.Ахмедовым и другими авторами, исследования которых, можно разделить на два направления: разработка асимптотических теорий и теорий типа Тимошенко и Рейсснера. За последние несколько десятилетий разработаны теории колебания пластин, основанные на методе точных решений в преобразованиях Г.И.Петрашеня.

Указанным методом разработаны различные варианты однородных и трехслойных пластин в упругой и вязкоупругой постановках профессором И.Г.Филипповым и его учениками. В них при выводе уравнений колебания трехслойных пластин допущены следующие предпосылки: 1) рассматриваются трехслойные пластинки только симметричной структуры; 2) в качестве неизвестных берутся главные части составляющих перемещений точек срединной поверхности заполнителя, количество которых в общем случае равно шести. Если же, при этом, граничные условия сформулировать точно, то число неизвестных возрастет, по признанию самих авторов до двенадцати;

3) граничные условия формулируются относительно главных частей перемещений срединной поверхности, что в принципе не верно; 4) указанные факторы в конечном итоге вынуждают авторов к выполнению существенных упрощений, приводящие к некоторым неточностям, приближая получаемые уравнения колебания трехслойной пластинки к уравнению колебания однородной пластинки; 5) полученные уравнения колебания трехслойной пластинки, в частном случае не переходят в уравнения колебания двухслойной пластинки (из-за симметричности структуры рассматриваемой трехслойной пластинки, отсутствие одного из внешних слоев влечет за собой отсутствие второго внешнего слоя).

На сегодняшний день разработка теории нестационарных колебаний трехслойной вязкоупругой пластинки с учетом упругих и вязкоупругих свойств материалов в достаточной степени не изучены.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Диссертационное исследование выполнено в соответствие с планами научно-исследовательских работ Самаркандского государственного университета «Исследование колебаний и устойчивости дискретно-непрерывных систем, взаимодействующих с деформируемой средой» (2000-2020).

Целью исследований являются: разработка методики динамического расчета нестационарных колебаний трехслойных пластин; создание математической модели и алгоритма определения усилий и перемещений в точках произвольного поперечного сечения колеблющейся пластинки; применение разработанной методики на случаи расчета трехслойных пластин, находящихся под воздействием статических, импульсных и других нагрузок.

Задачи исследования:

разработка новой методики расчета слоистых пластин на действие динамических нагрузок;

постановка и решение новых прикладных задач о колебаниях трехслойных пластин, подвергнутых действию динамических нагрузок и разработка соответствующих методик численных расчетов;

расчет конкретных показателей влияния геометрических и упругих характеристик несущих слоев и заполнителя на амплитуду и частоты колебаний, а также на напряженно-деформированное состояние пластинки;

создание алгоритма, позволяющего произвести расчет трехслойных пластин с различными граничными условиями при действии различного вида динамических нагрузок и при переходе на двухслойные и однородные пластинки;

Объектом исследования являются трехслойные вязкоупругие пластинки, широко используемые в современной технике, строительстве.

Предметом исследований является изучение динамического поведения трехслойных вязкоупругих пластин при различных, переменных во времени нагрузках.

Методы исследований: метод вывода разрешающих уравнений Г.М.Петрашеня-И.Г.Филиппова без применения гипотез и предпосылок, методы интегрального преобразования Фурье и Лапласа, метод гармонического анализа, другие аналитические и численные методы, многократно апробированные исследователями.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

предложена новая методика расчета слоистых пластин на действие динамических нагрузок;

поставлены и решены новые прикладные задачи о колебаниях трехслойных пластин, подвергнутых действию динамических нагрузок и ударных волн;

получены конкретные показатели влияния геометрических и упругих характеристик несущих слоев и заполнителя на амплитуду и частоты колебаний, а также на напряженно-деформированное состояние пластинки;

создан алгоритм, позволяющий произвести расчет трехслойных пластин с различными граничными условиями при действии различного вида динамических нагрузок и при переходе на двухслойные и однородные пластинки.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

предложена математическая модель, формулы для аналитического и численного расчета трехслойных пластин, находящихся под действием динамических нагрузок;

результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния трехслойной пластины и решение задачи по определению форм и частот свободных колебаний, а также задач о колебаниях трехслойной пластины при различных способах закрепления кромок пластины;

результаты решения задач о колебаниях трехслойной пластины, находящейся под действием динамических, в частности импульсных, нагрузок;

алгоритм численного расчета, позволяющего произвести динамический расчет трехслойных пластин при различных граничных условиях и внешних нагрузках.

Достоверность результатов диссертационной работы детально обоснована. Основные результаты получены в итоге применения обоснованных и многократно апробированных исследователями математических и численных методов к задачам, обусловленным практическими запросами современной техники и строительства. Достоверность выведенных формул расчета и численных решений задач подтверждается систематической проверкой, и сопоставлением с результатами других исследований, а также в частном случае предельного перехода к однородному пластинке, с широко известными для нее результатами.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования состоит в развитии методов решения задач динамики трехслойных пластин; в решении новых задач о колебаниях трехслойной пластинки при воздействии на него изменяющихся во времени нагрузок, а также в возможностях обобщения разработанных методик для различных закреплений краев пластинки и на случаи двуслойных и однородных пластин.

Практическая значимость результатов исследования состоит в создании необходимого аналитико-численного алгоритма для решения прикладных задач о напряженно-деформированном состоянии трехслойных упругих и вязкоупругих пластин при действии внешних динамических нагрузок. Кроме того, полученные результаты в силу того, что имеют достаточно общий характер, могут быть распространены на некоторые частные случаи, например для двухслойных и однородных пластин с учетом реологических, анизотропных и др. свойств материалов слоев пластинки. Полученные результаты могут быть использованы для количественного и качественного анализа поведения трехслойных пластин при решении практических задач в области строительства и техники.

Внедрение результатов исследования. На основе разработанных математических моделей, вычислительных методов, алгоритмов и программного обеспечения для численного анализа нестационарного колебания трехслойных композитных пластин проведены:

расчеты прогибов трехслойных пластин под воздействием неподвижных, но динамических и подвижных нагрузок, внедрена в ООО «Меьмор Уткир Човка» в результате которого предотвращено чрезмерное усиление пластины плотным слоем арматуры (справка министерство Строительства Республики Узбекистан №1186/30-01 от 8 июня 2018 г.). Это позволило увеличить расстояние между арматурами до 0,05м, что привело к экономии металла до 20% по сравнению с первоначально предусмотренным их количеством;

оценка деформированного состояния трехслойной пластинки внедрена в ООО «Меьмор Уткир Човка» на процесс определения точек пластин наибольшего прогиба (справка министерство Строительства Республики Узбекистан №1186/30-01 от 8 июня 2018 г.). В результате способом подкрепления таких точек достигнуто повышение несущей способности пластинки на 12-14%;

расчет нормальных к плоскости пластинки полей напряжений трехслойной и двухслойной пластинок для оценки устойчивости по известным критериям, при сохранении условий устойчивости, внедрен в ООО «СВП МАСКАН» (справка министерство Строительства Республики Узбекистан №1186/30-01 от 8 июня 2018 г.), который позволил сэкономить расходный материал до 9-10%;

расчет прогибов трехслойной пластинки на действие неподвижных, но динамических и подвижных нагрузок, внедрены в ООО «СВП МАСКАН» на процесс предотвращения чрезмерное усиление пластин плотным слоем арматуры (справка министерство Строительства Республики Узбекистан №1186/30-01 от 8 июня 2018 г.). В результате осуществлен расчет напряженно-деформированного состояния пластин перекрытия с учетом их трехслойности дал возможность снизить вес конструкции 7%.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 8 научних конференциях, в том числе на 1 международных и 7 республиканских.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 5 входят в перечень научных изданий, предложенных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 1 опубликована в зарубежном журнале и 4 – вреспубликанских научных изданиях.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 120 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дана развернутая характеристика актуальности проблемы, поставлена цель диссертационной работы, выделены главные вопросы, подлежащие разработке, охарактеризованы основные положения научной новизны диссертации, которые выносятся на защиту и обоснована достоверность полученных результатов. Дана краткая характеристика научной и практической значимости полученных в работе результатов, приведен список конференций и семинаров, где докладывались результаты диссертации, описаны структура и объем работы.

Первая глава диссертации, названной **«Нестационарные колебания трехслойных вязкоупругих пластин. Обзор научных исследований»**, посвящена изучению состояния и общего обзора проблемы динамического расчета упругих тел и элементов инженерных конструкций типа многослойных стержней, пластин и оболочек; выработке общей программы дальнейших исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, а также выбору основных разрешающих уравнений колебания трехслойной пластины.

В параграфе 1.1 в результате изучения научных публикаций по теме диссертационной работы выделены основные направления исследований по динамике многослойных стержней, пластин и оболочек. При этом основной акцент в обзоре по многослойным элементам инженерных конструкций делается на двух - и трехслойные пластины.

Задачи, рассматриваемые в диссертационной работе, основываются на уравнениях колебания трехслойных пластин, выведенных на основе метода, предложенных профессорами Г.И.Петрашенем и И.Г.Филипповым. Поэтому, в рамках этого раздела более подробно освещены основные идеи и подходы, использованные при разработке указанных уравнений. Кроме того, детально проанализированы опубликованные и имеющие отношение к вопросам, исследуемым в диссертации, работы узбекских ученых, в частности, академиков Т.Р.Рашидова, Т.Ш.Ширинкулова, М.Мирсаидова и профессоров К.С.Султанова, Т.Мавлонова, А.Б.Ахмедова и др.

Проанализировано большое количество литературных источников по колебаниям многослойных элементов инженерных конструкций. В результате сделан вывод о том, что многие вопросы теории колебания многослойных элементов конструкций, в частности, трехслойных и многослойных пластин и оболочек, развиты недостаточно и необходимо дальнейшее развитие, и усовершенствование методики расчета динамики трехслойных пластин, а также решение актуальных прикладных задач о нестационарных их колебаниях.

Параграф 1.2 посвящен постановке общей задачи о колебаниях трехслойной пластинки и методу её решения подлежащих, в дальнейшем, исследованию в рамках диссертации. Рассматривается бесконечная в плане трёхслойная вязкоупругая пластинка. Считается, что рассматриваемая пластинка является трехмерным телом. Слои пластинки изготовлены из вязкоупругих материалов одинаковой структуры и той же геометрии при условии геометрической и физической линейности, сверху и снизу (рис 1) имеют разные толщины, и не ограничены в плоскости, границы раздела между слоями являются плоскими и находятся в тех или иных условиях контактного взаимодействия. При этом нижний и верхний слои в дальнейшем названы «несущими слоями».

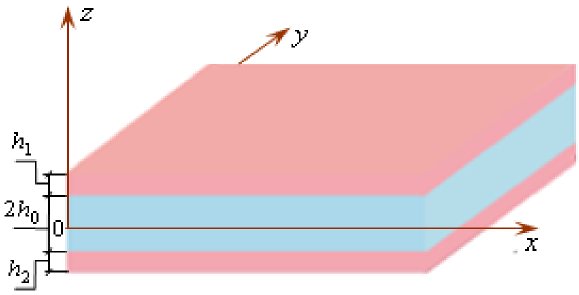


Рис.1 Элемент трехслойной пластинки

Пластинка отнесена к декартовой системе прямоугольных координат $Oxyz$ (рис.1). Слои пластинки пронумерованы как на рис.1, т.е. верхний несущий слой назван первым слоем, нижний несущий слой – вторым, а срединный слой или заполнитель – нулевым слоем.

Через h_1, $2h_0$ и h_2 обозначены толщины первого, нулевого и второго слоев; через λ_m, μ_m – упругие постоянные материалов слоев, т.е. коэффициенты Ламе; ρ_m – объёмные плотности слоев. При этом индекс «m» всегда пробегает значения 0,1,2. Считается, что вязкоупругие характеристики материалов слоев описываются интегральными операторами Больцмана-Вольтерра

$$L_{1m}(\zeta)=\lambda_m\left[\zeta(t)-\int_0^t K_{1m}(t-\tau)\zeta(\tau)d\tau\right];\; M_m(\zeta)=\mu_m\left[\zeta(t)-\int_0^t K_{2m}(t-\tau)\zeta(\tau)d\tau\right]. \quad (1)$$

Здесь $K_{1m}(\tau), K_{2m}(\tau)$ – ядра вязкоупругих операторов L_{1m} и M_m $(m=0,1,2)$, зависящие от свойств материалов слоев. При этом предполагается, что оператора L_{1m} и M_m $(m=0,1,2)$ – обратимы, а ядра $K_{1m}(\xi)$ и $K_{2m}(\xi)$ – произвольные.

Зависимости напряжений $\sigma_{ij}^{(m)}$ $(i, j=1,2,3;\; m=0,1,2)$, от деформаций $\varepsilon_{ij}^{(m)}$ $(i, j=1,2,3;\; m=0,1,2)$, в точках слоев пластинки описываются линейными операторами в виде Больцмановских интегральных соотношений:

$$\begin{aligned}&\sigma_{ii}^{(m)}=L_{1m}\left(\varepsilon^{(m)}\right)+2M_m\left(\varepsilon_{ii}^{(m)}\right); && (i=1,2,3),\\ &\sigma_{ij}^{(m)}=M_m\left(\varepsilon_{ij}^{(m)}\right); && (i, j=1,2,3;\; i\neq j),\end{aligned} \qquad \varepsilon^{(m)}=\varepsilon_{11}^{(m)}+\varepsilon_{22}^{(m)}+\varepsilon_{33}^{(m)};\; (m=0,1,2). \quad (2)$$

Для описания движений точек составляющих слоев пластинки в системе декартовых координат $0x^1x^2x^3$ приняты уравнения движения

$$\sigma_{ij,j}^{(m)}=\rho_m\frac{\partial^2\vec{U}^{(m)}}{\partial t^2};\quad (m=0,1,2), \quad (3)$$

где $\vec{U}^{(m)}$- векторы перемещений точек слоев; t-время. Далее введены скалярные -φ_m и векторные - $\vec{\psi}_m$ потенциалы по формулам

$$\vec{U}^{(m)} = grad\varphi_m + rot\vec{\psi}_m, \tag{4}$$

$$\vec{U}^{(m)} = \vec{U}\left(U^{(m)}, V^{(m)}, W^{(m)}\right); \quad \vec{\psi}_m = \vec{\psi}\left(\psi_{1m}, \psi_{2m}, \psi_{3m}\right); \quad (m = 0,1,2)$$

При этом считается, что векторные потенциалы $\vec{\psi}_m$ удовлетворяют условиям соленоидальности векторных полей

$$div\vec{\psi}_m = 0, \quad (m = 0,1,2) \tag{5}$$

Подставив (4) в систему (3) нетрудно получить уравнения движения точек вязкоупругих слоев пластинки в виде волновых уравнений для потенциалов продольных φ_m и поперечных $\vec{\psi}_m$ волн

$$L_m(\Delta\varphi_m) = \rho_m \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial t^2}; \quad M_m(\Delta\vec{\psi}_m) = \rho_m \frac{\partial^2 \vec{\psi}_m}{\partial t^2}; \quad (m = 0,1,2), \tag{6}$$

где введены обозначения

$$L_m = L_{1m} + 2M_m; \qquad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Далее компоненты векторов перемещений, тензоров деформаций и напряжений выражены через потенциалы φ_m и ψ_m $(m = 0,1,2)$.

Предполагается, что при $t < 0$ пластинка находилась в покое, а в момент $t = 0$, к её граничным плоскостям (к внешним плоскостям несущих слоев) при $z = \pm h_i^*$; $h_i^* = h_0 + h_i$, $(i = 1,2)$ прикладываются динамические воздействия.

$$\sigma_{xz}^{(i)}(x,y,z,t)\Big|_{z=\pm h_i^*} = \pm F_{xz}^{(i)}(x,y,t); \quad \sigma_{yz}^{(i)}(x,y,z,t)\Big|_{z=h_i^*} = \pm F_{yz}^{(i)}(x,y,t);$$

$$\sigma_{zz}^{(i)}(x,y,z,t)\Big|_{z=\pm h_i^*} = \pm F_z^{(i)}(x,y,t), \quad (i = 1,2). \tag{7}$$

В соответствии с принятым предположением о том, что при $t < 0$ пластинка находилась в покое, будем считать, что все слои находятся в покое, что равносильно нулевым начальным условиям при $t = 0$

$$\varphi_m = \psi_{km} = \frac{\partial \varphi_m}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_{1m}}{\partial t} = 0, \quad (m = 0,1,2). \tag{8}$$

Кроме граничных условий (7), на контактных с нижней и верхней несущими слоями плоскостях заполнителя, имеют места динамические и кинематические контактные условия:

а) на контактной плоскости между верхним несущим слоем и заполнителем при $z = h_0$:

$$\begin{gathered} \sigma_{zz}^{(0)} = \sigma_{zz}^{(1)}; \quad \sigma_{xz}^{(0)} = \sigma_{xz}^{(1)}; \quad \sigma_{yz}^{(0)} = \sigma_{yz}^{(1)}; \\ U_0 = U_1; \quad V_0 = V_1; \quad W_0 = W_1. \end{gathered} \tag{9}$$

б) на контактной плоскости между нижним несущим слоем и заполнителем при $z = -h_0$:

$$\begin{gathered} \sigma_{zz}^{(0)} = \sigma_{zz}^{(2)}; \quad \sigma_{xz}^{(0)} = \sigma_{xz}^{(2)}; \quad \sigma_{yz}^{(0)} = \sigma_{yz}^{(2)}; \\ U_0 = U_2; \quad V_0 = V_2; \quad W_0 = W_2. \end{gathered} \tag{10}$$

Следует подчеркнуть, что начальные условия для потенциалов– (8) адекватны начальным условиям для перемещений U_m, V_m, W_m $(m = 0,1,2)$ при $t = 0$:

$$U_m = V_m = W_m = 0\,; \qquad \frac{\partial U_m}{\partial t} = \frac{\partial V_m}{\partial t} = \frac{\partial W_m}{\partial t} = 0\,. \tag{11}$$

Таким образом, при общей постановке задачи о нестационарных колебаниях пластинки, задача приводится к решению для каждого слоя четырех уравнений (например, относительно функций $\varphi_0, \psi_{10}, \psi_{20}, \psi_{30}$ для нулевого слоя или заполнителя) – (6), при граничных (7) и контактных – (9), (10) и нулевых начальных условиях – (8) или (11).

Далее, в рамках этого параграфа, приведен общий метод решения поставленной задачи, который будет продемонстрирован ниже на примере решения конкретной задачи о симметричных колебаниях трехслойной пластины.

В параграфе 1.3 сформулированы три группы прикладных задач о колебаниях трехслойной пластинки:

1^0. К первой группе относятся задачи, формулировка которых зависит от направления действий напряжений, а также от их значений (отлично от нуля напряжение или нет). Сюда относятся два вида колебаний - симметричные и антисимметричные колебания пластинки.

2^0. Ко второй группе относятся задачи о колебаниях слоистых пластин с различными контактными условиями между слоями пластинки. При этом могут быть три типа таких задач: 1) жесткий контакт; 2)идеальный контакт; 3) наличие трения скольжения по Кулону

3^0. К третьей группе относятся задачи с различными условиями на кромках пластинки. В этих случаях можно сформулировать различные граничные условия в зависимости от закрепления краев пластинки. В диссертации приведены четыре таких, известных из литературных источников, случаи постановки краевых задач колебания пластин: 1) все четыре края пластинки жестко защемлены; 2) все четыре края пластинки шарнирно закреплены; 3) все четыре края пластинки свободно оперты; 4) различные комбинации приведенных выше случаев. Например, два края пластинки жестко защемлены, а два других свободны; два края шарнирно закреплены, а два других жестко защемлены, и т.д.

Вторая глава диссертации, названной **«Уравнения нестационарных симметричных колебаний трехлойной вязкоупругой пластины»**, посвящена разработке теории нестационарных колебаний трехслойной вязкоупругой пластинки по тому же методу точных решений, но свободной от указанных выше недостатков и в плоской постановке. Считается, контакты между несущими слоями и заполнителем жесткие.

Параграф 2.1 посвящен выводу общих уравнений симметричных колебаний трехслойной вязкоупругой пластинки. Общая постановка задачи приведена выше, в разделе 1.2, для трехмерного случая. Учитывая неограниченность размеров пластинки, в дальнейшем считается, что она находиться в условиях плоской деформации и, отнесена к системе прямоугольных координат Oxz (рис.1).

В случае плоской деформации векторы перемещений точек слоев равны

$$\vec{U}^m = U_m \cdot \vec{i} + W_m \cdot \vec{k}; \quad U_m = U_m(x,z,t); \qquad W_m = W_m(x,z,t), \tag{12}$$

где $\vec{i}$, $\vec{k}$ –единичные орты осей координат, достаточно в (4) положить

$$\varphi_m = \varphi_m(x,z,t); \qquad \vec{\psi}_m = \psi_m(x,z,t)\vec{j} \tag{13}$$

где $\vec{j}$ – единичный орт оси $Oy,$ чтобы уравнения движения точек слоев пластинки из двенадцати обыкновенных дифференциальных уравнений (6) приобрели вид шести волновых уравнений относительно потенциальных функций $\varphi_m(x,z,t)$ и $\psi_m(x,z,t)$. При этом оператор Лапласа примет вид

$$\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial z^2 . \tag{14}$$

Заметим, что условие соленоидальности векторных полей $\vec{\psi}_m$ - (5), в случае представлений (13) выполняются автоматически.

Легко выразить компоненты векторов перемещений, а также тензоров деформаций и напряжений слоев пластинки через введенные потенциальные функции (3). Например

$$U_m = \frac{\partial \varphi_m}{\partial x} - \frac{\partial \psi_m}{\partial z}; \;\; \varepsilon_{xx}^{(m)} = \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_m}{\partial x \partial z}; \ldots\ldots\ldots.(m = 0,1,2). \tag{15}$$

В силу линейности теории вязкоупругости можно представить воздействия общего вида, а следовательно, соответствующего ему поля смешений (12), в виде наложения симметричной и антисимметричной частей

$$\vec{U}_m = \vec{U}_m^s + \vec{U}_m^a , \tag{16}$$

где $\vec{U}_m^s$ -симметричная (продольная), $\vec{U}_m^a$ -антисимметричная (изгибная) части полей перемещений слоев пластины. При этом суммарное поле (16) удовлетворяет граничным условиям (7), а симметричная её часть должна удовлетворят условиям (7) при

$$f_x^{(1)}(x,t) = -f_x^{(2)}(x,t) = \frac{1}{2}\left(F_x^{(1)} + F_x^{(2)}\right); \;\; f_z^{(1)}(x,t) = f_z^{(2)}(x,t) = \frac{1}{2}\left(F_z^{(1)} + F_z^{(2)}\right) \tag{17}$$

т.е. граничные условия задачи (7) в этом случае имеют вид

$$\begin{aligned} &\sigma_{xz}^{(i)}(x,z,t)\Big|_{z=(-1)^{i-1}h_i^*} = f_x^i(x,t); \qquad \sigma_{zz}^{(i)}(x,z,t)\Big|_{z=(-1)^{i-1}h_i^*} = f_z^i(x,t); \\ &\sigma_{yz}^{(i)}(x,z,t)\Big|_{z=(-1)^{i-1}h_i^*} = 0; \quad h_i^* = h_0 + h_i, (i = 1,2) \end{aligned} \tag{18}$$

Кроме того, на поверхностях заполнителя $z = \pm h_0$ имеют места динамические и кинематические контактные условия

$$\sigma_{zz}^{(0)}(x,z,t)\Big|_{z=\pm h_0} = \begin{cases} \sigma_{zz}^{(1)}(x,z,t)\Big|_{z=h_0}, \\ \sigma_{zz}^{(2)}(x,z,t)\Big|_{z=-h_0}; \end{cases} \qquad \sigma_{xz}^{(0)}(x,z,t)\Big|_{z=\pm h_0} = \begin{cases} \sigma_{xz}^{(1)}(x,z,t)\Big|_{z=h_0}, \\ \sigma_{xz}^{(2)}(x,z,t)\Big|_{z=-h_0}; \end{cases} \tag{19}$$

$$\sigma_{yz}^{(0)}(x,z,t)\Big|_{z=\pm h_0} = 0,$$

и

$$U_0(x,z,t)\big|_{z=\pm h_0}=\begin{cases}U_1(x,z,t)\big|_{z=h_0};\\ U_2(x,z,t)\big|_{z=-h_0},\end{cases} W_0(x,z,t)\big|_{z=\pm h_0}=\begin{cases}W_1(x,z,t)\big|_{z=h_0};\\ W_2(x,z,t)\big|_{z=-h_0}.\end{cases} \quad (20)$$

Начальные условия задачи считаются нулевыми, т.е. при $t=0$

$$\varphi_m=\psi_m=0,\ \frac{\partial\varphi_m}{\partial t}=\frac{\partial\psi_m}{\partial t}=0. \quad (21)$$

Таким образом, решение задачи о нестационарных колебаниях трехслойной пластинки приводится к решению шести интегро-дифференциальных уравнений второго порядка (6) с двенадцатью граничными и контактными условиями (18)- (20), а также нулевыми начальными условиями (21).

Для решения поставленной задачи функции внешних воздействий, т.е. функций $f_x^{(1,2)}(x,t)$ и $f_z^{(1,2)}(x,t)$ из (17) представлены в виде

$$f_x^{(1,2)}(x,t)=\int_0^\infty\left.\begin{matrix}\cos kx\\ \sin kx\end{matrix}\right\}dk\int_{(l)}\tilde f_x^{(1,2)}(k,p)e^{pt}dp;\quad f_z^{(1,2)}(x,t)=\int_0^\infty\left.\begin{matrix}\sin kx\\ -\cos kx\end{matrix}\right\}dk\int_{(l)}\tilde f_z^{(1,2)}(k,p)e^{pt}dp, \quad (22)$$

где $\tilde f_x^{(i)}(k,p)$, и $\tilde f_z^{(i)}(k,p)$, $(i=1,2)$ – функции, регулярные при $\operatorname{Re}p>0$. Эти функции имеющют конечное число полюсов, принимают произвольные значения внутри некоторой области $\Omega(k,p)$, содержащий промежуток $(-i\omega_0,\, i\omega_0)$ мнимой оси и пренебрежимо малые при $k>k_0$; (l)– контур $\operatorname{Re}p=\nu>0$ на комплексной области (P), оставляющего область $\Omega(k,p)$ правее себя по k.

В соответствие с принятыми представлениями для функций внешних воздействий, решение задачи (6), (18)- (20) и (21) будем искать в виде (22), подстановка которых в уравнения (6) приводит к обыкновенным дифференциальным уравнениям относительно потенциальных функций. Общие решения полученных уравнений имеют вид

$$\begin{aligned}&\tilde\varphi_m(z,k,p)=A_1^{(m)}(k,p)ch\alpha_m z+A_2^{(m)}(k,p)sh\alpha_m z;\\ &\tilde\psi_m(z,k,p)=B_1^{(m)}(k,p)sh\beta_m z+B_2^{(m)}(k,p)ch\beta_m z;\ (m=0,1,2),\end{aligned} \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned}&\alpha_m^2=k^2+\rho_m p^2\tilde L_m^{-1};\ \beta_m^2=k^2+\rho_m p^2\tilde M_m^{-1};\ \tilde L_m=(\lambda_m+2\mu_m)\left[1-\tilde K_{1m}(p)\right];\\ &\tilde M_m=\mu_m\left[1-\tilde K_{2m}(p)\right];\ \tilde K_{im}(p)=\int_0^\infty K_{im}(\tau)e^{-pt}dt;\ \arg\alpha=\arg\beta=0,\ \textit{при}\ \rho>0.\end{aligned} \quad (24)$$

В случае симметричных воздействий в соответствии с (17),

$$f_x^{(2)}=-f_x^{(1)}\quad \text{и} \quad f_z^{(2)}=f_z^{(1)}$$

что влечет за собой то, что в (23) следует полагать

$$A_2^{(m)}=0,\qquad B_2^{(m)}=0,\qquad (m=0,1,2).$$

Тогда, решениями уравнений (6) в случае симметричных колебаний пластины будут

$$\tilde\varphi_m(z,k,p)=A_1^{(m)}(k,p)ch\alpha_m z;\ \tilde\psi_m(z,k,p)=B_1^{(m)}(k,p)sh\beta_m z,\ (m=0,1,2). \quad (25)$$

Перемещения u_m и w_m также представим в виде (22). Подставляя которых и в выражения перемещений типа (15) получим формулы для преобразованных перемещений $\tilde{U}_m$ и $\tilde{W}_m$. Используя в полученных выражениях стандартные разложения гиперболических функций в степенные ряды, получим

$$\tilde{U}_m = \sum_{n=0}^{\infty} \left[k\alpha_m^{2n} \cdot A_1^{(m)} - \beta_m^{2n+1} B_1^{(m)} \right] \frac{z^{2n}}{(2n)!}; \; \tilde{W}_m = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\alpha_m^{2n+2} \cdot A_1^{(m)} - k\beta_m^{2n+1} B_1^{(m)} \right] \frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!}. \quad (26)$$

В качестве искомых функций, в уравнениях колебания трехслойной пластинки, примем главные части преобразованных перемещений $\tilde{U}_0$ и $\tilde{W}_0$ такой поверхности нулевого слоя, расстояние от поверхности $z = 0$ которой определяется формулой

$$\xi = \chi \cdot h_0, \qquad -1 \le \chi < 0; \quad 0 \le \chi < 1 \qquad (27)$$

где χ-постоянное число, удовлетворяющее неравенству $-1 \le \chi \le 1$. Для этого в уравнениях (26) примем $z = \xi,\ m = 0$ и $n = 0$. Тогда введя обозначения $\tilde{U}_0^{(0)}$ и $\tilde{W}_0^{(0)}$ получим

$$A_1^{(0)} = \frac{\frac{1}{\xi}\tilde{W}_0^{(0)} - k\tilde{U}_0^{(0)}}{\alpha_0^2 - k^2}; \quad \beta_0 B_1^{(0)} = \frac{\frac{k}{\xi}\tilde{W}_0^{(0)} - \alpha_0^2\tilde{U}_0^{(0)}}{\alpha_0^2 - k^2}. \qquad (28)$$

Далее выражая перемещения и напряжения через введенные функции $\tilde{U}_0^{(0)}$ и $\tilde{W}_0^{(0)}$ и подставляя их в граничные и контактные условия, получены следующие уравнения симметричных колебаний трехслойной вязкоупругой пластинки

$$\left\{ c_{11}\frac{\partial^4}{\partial t^4} + c_{12}\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} + c_{13}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + c_{14}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + c_{15}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{16} \right\} \frac{\partial}{\partial x} W_0^{(0)}(x,t) +$$
$$+ \left\{ d_{11}\frac{\partial^4}{\partial t^4} + d_{12}\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} + d_{13}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + d_{14}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + d_{15}\frac{\partial^2}{\partial x^2} \right\} U_0^{(0)}(x,t) =$$
$$= \left\{ s_{11}\frac{\partial^4}{\partial t^4} + s_{12}\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} + s_{13}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + s_{14}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + s_{15}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + s_{16} \right\} f_x^{(1)}(x,t); \qquad (29)$$
$$\left\{ c_{21}\frac{\partial^4}{\partial t^4} + c_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} + c_{23}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + c_{24}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + c_{25}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + c_{26} \right\} W_0^{(0)}(x,t) +$$
$$+ \left\{ d_{21}\frac{\partial^4}{\partial t^4} + d_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} + d_{23}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + d_{24}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + d_{25}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + d_{26} \right\} \frac{\partial}{\partial x} U_0^{(0)}(x,t) =$$
$$= \left\{ s_{21}\frac{\partial^4}{\partial t^4} + s_{22}\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} + s_{23}\frac{\partial^4}{\partial x^4} + s_{24}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + s_{25}\frac{\partial^2}{\partial x^2} + s_{26} \right\} f_z^{(2)}(x,t),$$

где коэффициенты c_{ij}, d_{ij}, s_{ij} определяются по формулам типа

$$c_{11} = -\frac{1}{\xi}\Bigg[\left(q_0\rho_1 M_1^{-1} + (1-q_1)\rho_0 L_0^{-1}\right)\rho_1 L_1^{-1} \frac{(h_0+h_1)h_0^4}{12} + \Big(\big(2q_1\rho_0 M_0^{-1} + 3(1+q_1-q_0q_1)\rho_1 M_1^{-1} +$$
$$+ 2q_0q_1\rho_0 L_0^{-1}\big)\rho_1 L_1^{-1} + \left((1+q_1)\rho_0 M_0^{-1} + (1+q_1)q_0\rho_0 L_0^{-1}\right)\rho_1 M_1^{-1} + 3q_0(1-q_1)\rho_1 L_1^{-1}\rho_1 L_1^{-1}\Big)\frac{(h_0+h_1)^3 h_0^2}{36} \Bigg];$$

- -

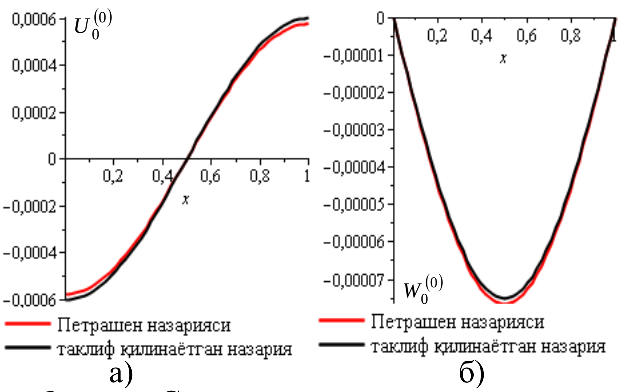
Полученные уравнения являются уравнениями в частных производных гиперболического типа. Это является важным для правильного описания процессов нестационарного колебания пластин. Кроме того, они содержать в своих структурах члены, учитывающие инерцию вращения и деформации поперечного сдвига. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что полученные уравнения являются более общими, чем уравнения типа С.П.Тимошенко. При этом, следует подчеркнуть, что эти уравнения выведены, в отличие от классических Кирхгоффа и типа Тимошенко уравнений, без привлечения дополнительных гипотез и предпосылок, а также искусственно вводимых поправочных коэффициентов.

Во параграфе 2.2 выведены формулы для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) слоев вязкоупругой пластинки при её симметричных колебаниях. Алгоритм расчета НДС трехслойной вязкоупругой пластинки состоит в выражении всех компонент тензоров напряжений $\sigma_{xx}^{(m)}$, $\sigma_{zz}^{(m)}$, $\sigma_{xz}^{(m)}$, $(m=0,1,2)$ и перемещений U_m, W_m, $(m=0,1,2)$ через общие решения (25).

Данная задача выполнена для срединного слоя и отдельно для несущих слоев пластинки. Вначале перемещения U_0 и W_0, и компоненты напряжения $\sigma_{xx}^{(0)}$, $\sigma_{zz}^{(0)}$, $\sigma_{xz}^{(0)}$ выражены через искомые функции $U_0^{(0)}(x,t)$, $W_0^{(0)}(x,t)$, которые являются главными частями продольного и поперечного перемещений точек поверхности, отстоящей от координатной плоскости в направлении оси Oz на расстояние ξ, срединного слоя трехслойной пластинки. Затем выведены аналогичные формулы, позволяющие определить с заранее заданной точностью параметры НДС произвольных сечений несущих слоев.

Параграф 2.3 посвяшен анализу частных и предельных случаев, вытекающих из общих уравнений симметричных колебаний трехслойной вязкоупругой пластинки и соответствующих формул для определения НДС пластинки. Сперва доказана, что полученные уравнения колебания трехслойной вязкоупругой пластинки являются более общими по сравнению с известными уравнениями теории С.Г.Лехницкого, С.А.Амбарцумяна, Е.Рейсснера.

Затем из системы уравнений (29), как частный случай, выведены уравнения симметричных колебаний упругой трехслойной пластинки. В дальнейшем для простоты и для сравнения с уравнениями других авторов, рассмотрены уравнения колебания двухслойных и однослойных (однородных) пластин использованы уравнения упругой пластинки.



2-расм. Сравнение продольного перемещения U и поперечного перемещения W по различныи теориям при $t=0.6$; $0\le x\le 1$.

Выведены уравнения двухслойной пластинки и однородной пластинки для сравнения с известными результатами других авторов. В случае однородной пластинки сравнение с результатами Г.И.Петрашеня и Э.В.Хинена показало, что уравнения колебания по обеим теориям совпадают по структуре, но имеются некоторые различия в значенях коэффициентов.

В параграфе 2.4 численные расчеты перемещений (рис.2 а) и б)) по этим теориям, которые показали почти полное совпадение результатов, что является доказательством достоверности полученных результатов.

Третья глава диссертации, названной **«Симметричные колебания трехслойных пластин, закрепленных различными способами»,** посвящена численному решению конкретных прикладных задач о симметричных колебаниях трехслойной упругой пластинки, находящейся под действием внешних нагрузок.

В параграфе 3.1 решена задача о симметричных колебаниях трехслойной упругой пластинки, неограниченной длины и шириной l в плоской постановке. Пластинка считается шарнирно закрепленной по торцам. Считается, что симметричные колебания пластинки возбуждаются силами (17) $f_x^{(1)}(x,t)=f_x(x,t)$ и $f_z^{(1)}(x,t)=f_z^{(2)}(x,t)=f_z(x,t)$ заданными на граничных плоскостях пластинки при $z=\pm(h_0+h_i),\ i=1{,}2$. Эти функции при разработке методики решения задачи считаются произвольными, удовлетворяющими условиям, сформулированными выше (формулы (22)).

Конкретные виды функций $f_x(x,t)$ и $f_z(x,t)$ заданы при численной реализации задачи. Задача решена на основе разработанных во второй главе приближенных уравнений колебания и алгоритма определения НДС в сечениях пластинки. Числовые значения искомых величин получены с помощью пакета прикладных программ Maple 12, при заданных значениях геометрических и физико-механических параметров слоев пластинки

Доказано, что точки сечений пластинки, находящихся левее срединного сечения $x=0{,}5$ получают положительные перемещения, т.е. продольные волокна пластинки в левой ее половине испытывают растяжения. С другой стороны в тех же моментах времени точки сечений пластинки, находящихся правее срединного сечения $x=0{,}5$, получают отрицательные перемещения, т.е. продольные волокна пластинки в правой ее половине испытывают сжатие. Следует подчеркнуть, что данное двоякое поведение сечений, находящихся по разным сторонам срединного сечения пластинки, полностью согласуется с физической сущностью решаемой задачи.

Кроме того, показано, что можно наблюдать появление поперечных перемещений точек пластинки, имеющих незначительные числовые значения. Появление этих перемещений являются следствием наличия продольных внешних нагрузок f_x, действующих на лицевой и обратной сторонах пластинки. Полученные при этом результаты позволяют сделать вывод о том, что при симметричных колебаниях трехслойной пластинки можно пренебречь поперечными перемещениями точек.

Параграф 3.2 является логическим продолжением предыдущего раздела, называется «Напряженно-деформированное состояние трехслойной пластинки с шарнирно закрепленными торцами» и посвящен численному анализу напряженно–деформированного состояния, срединного и несущего слоев пластинки.

По предложенному во второй главе алгоитму определения НДС слоев пластинки вычислены продольное и поперечное перемещения точек срединного слоя. Полученные результаты представлены в виде трехмерных изображений и графиков перемещений и напряжений в зависимости от координаты и времени.

На рис.3 а), б) приведены трехмерные изображения продольного $U_0(x,t)$ и поперечного $W_0(x,t)$ перемещений точек срединного слоя (заполнителя). Из них следует, что амплитуды как продольного – U_0 так и поперечного – W_0 перемещений слоя в начальный момент времени незначительные. Затем, с течением времени, абсолютные значения амплитуд перемещений слоя возрастают.

Также проведен численный анализ напряженно – деформированного состояния верхнего несущего слоя пластинки. Аналогичные результаты имеют места и для нижнего несущего слоя. Для проверки достоверности полученных результатов были вычислены продольное перемещение и продольное нормальное напряжение по формулам для несущего слоя и заполнителя в одной точке контактной плоскости в зависимости от времени. Результаты расчетов почти идеальное совпадение как по перемещениям так и по напряжениям.

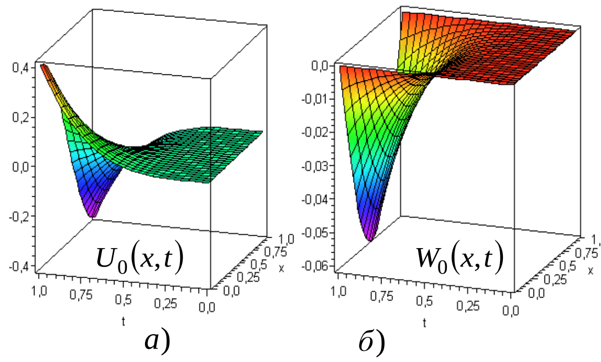


Рис.3. Трехмерные изображения зависимостей перемещений $U_0(x,t)$ и $W_0(x,t)$ срединного слоя от времени и координаты

В празрафе 3.3 данной главы решена задача о симметричных колебаниях трехслойной пластинки, защемленной по двум противоположным краям. Полученные результаты приведены в виде трехмерных изображений и графиков перемещений и напряжений в зависимости от координаты и времени. Проведен сравнительный анализ, исходя из которого, можно сделать вы вод о том, что несушие слои трехслойной пластинки деформируются больше, чем заполнитель. Значение отношения перемещений в соответствующих точках при одинаковом значении времени превышает в 1.5 и более раз. Аналогично, несущие слои трехслойной пластинки подвергаются действию напряжений превышающих по значению напряжений, действующих в срединном слое (заполнителе) в 1.5 и более раз.

Параграф 3.4 называется «Влияние характеристик материала на НДС трехслойной пластинки». В нем для определения и оценки влияния характеристик материала рассмотрена задача об определении НДС трехслойной пластинки, шарнирно опертой по краям. При этом, характеристики срединного слоя оставлены неизменными, а характеристики несущих слоев приняты в соответствии с типом применяемого материала.

Постановка задачи, алгоритм решения и метод её реализация приведены в первом параграфе данной главы. По полученным результатам сделаны соответствующие вывода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе на тему «Нестационарные колебания трехслойных композитных пластин», сводятся к следующим выводам:

1. Разработана теория нестационарных симметричных колебаний трехслойной вязкоупругой пластинки в плоской постановке свободной от гипотез и предпосылок.
2. Предложены общие уравнения колебания нестационарных симметричных колебаний трехслойной вязкоупругой пластинки, в плоской постановке из которых, в частных случаях, следуют уравнения колебания упругих трехслойных пластин, для двухслойных вязкоупругих и упругих пластин, однородных упругих и вязкоупругих пластин.
3. Из выведенных общих уравнений симметричных колебаний вязкоупругой пластинки можно получить пригодные для инженерной практики уточненные, типа С.П.Тимошенко уравнения, а таже уравнения классического типа, имеющие порядок не выше второго;
4. На основе выведенных уравнений колебания трехслойной пластинки, даны постановки новых задач колебания трехслойной пластинки, подвергнутого действию изменяющихся во времени нагрузок.
5. Разработаны эффективная математическая модель, методика расчёта, вычислительный алгоритм и некоторые аналитические решения расчета колебаний трехслойной пластинки с заданными граничными условиями при внешнем нагружении.
6. Эффективность разработанной методики и достоверность полученных результатов доказаны решением ряда прикладных задач, сравнением полученных результатов с известными точными и численными решениями других авторов.
7. Предложено общее аналитико-численное решение предложенных систем уравнений колебаний трехслойной пластинки на основе метода вариационных итераций на действие динамических нагрузок.

SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
SCIENCES DSc30.08.2018.FM/T.02.09 UNDER
SAMARKAND STATE UNIVERSITY

SAMARKAND STATE UNIVERSITY

KHUDAYBERDIYEV ZOKIR BOZORBOYEVICH

NONSTATIONARY VIBRATIONS OF THREE LAYERED COMPOSITE PLATE

01.02.04 – Solid Mechanics

ABSTRACT
of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Samarkand – 2019

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registred at the Supreme Attestatien Commission at the Cabinet of Ministers of thr Repablic of Uzbekistan under number №B2017.3.PhD/FM135

The dissertation has been prepared the Samarkand state University.

The absteract of the dissertation in posted in Threelanguages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website www.samdu.uz andan the website of "ZiyoNet" Information and educational portal www.ziyonet.uz.

Scientific adviser:	**Khudoynazarov Khayrulla** Doctor of Technical Sciences, Professor
Official opponents:	**Abdikarimov Rustamkhan Alimkhanovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
	Usarov Makhamatali Koraboevich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Leading organization:	**Tashkent Institute of Railway Transport Engineers**

The defense will take place «29» November 2019 at 11[00] at the meeting of scientific council DSc30.08.2018.FM/T.02.09 at Samarkand State University (Address: 140104, Samarkand, University street, 15, Tel.: (8366) 2351938. Fax: (8366) 2351938. E-mail: sasu_info@edu.uz.

The thesis is available in the Information and Resource Center of Samarkand State University (registration number 100). (Address: 140104, Samarkand, University street, 15, Tel.: (8366) 2351938. Fax: (8366) 2351938.

Abstract of dissertation sent out on «14» November 2019 y.
(mailing report № 6 on «14» November 2019 y.).

OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI • O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI

R.I.Khalmuradov
Chairman of scientific council for awarding degree, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor

A.Abdirashidov
Scientific secretary of scientific council for awarding degree, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Docent

A.Z.Khasanov
Chairman of scientific council seminar at the scientific council for the awarding academic degree, doctor of technical sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research is: development of a methodology for the dynamic calculation of unsteady oscillations of three-layer plates; creation of a mathematical model and algorithm for determining the forces and displacements at points of an arbitrary cross section of an oscillating plate; application of the developed methodology for cases of calculation of three-layer plates under the influence of static, pulsed and other loads.

The object of research is three-layer viscoelastic plates, widely used in modern technology, construction.

The scientific novelty of the dissertation research is as follows: a new method for calculating laminated plates on the action of dynamic loads is proposed; posed and solved new applied problems of vibrations of three-layer plates subjected to dynamic loads and shock waves; specific indicators of the influence of the geometric and elastic characteristics of the bearing layers and aggregate on the amplitude and frequency of oscillations, as well as on the stress-strain state of the plate are obtained; an algorithm has been created that allows the calculation of three-layer plates with different boundary conditions under the action of various types of dynamic loads and when switching to two-layer and homogeneous plates.

Implementation of research results. Based on the developed mathematical models, computational methods, algorithms, and software for the numerical analysis of unsteady oscillations of three-layer composite plates, the following were carried out:

calculations of deflections of three-layer plates under the influence of fixed, but dynamic and moving loads, were introduced at Memor Utkir Chovka LLC, which prevented excessive reinforcement of the plate with a dense layer of reinforcement (certificate of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan No. 1186 / 30-01 of June 8, 2018) This made it possible to increase the distance between the reinforcing bars up to 0.05 m, which led to metal savings of up to 20% compared with their originally provided amount;

assessment of the deformed state of a three-layer plate was introduced at Memor Utkir Chovka LLC on the process of determining the points of plates with the greatest deflection (certificate of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan No. 1186 / 30-01 of June 8, 2018). As a result, the method of reinforcing such points achieved an increase in the bearing capacity of the plate by 12-14%;

calculation of stress fields normal to the plane of the plate of the three-layer and two-layer plates to assess stability according to well-known criteria, while maintaining the stability conditions, was implemented in SVP MAS-KAN LLC (information from the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan No. 1186 / 30-01 of 8 June 2018), which allowed to save consumables up to 9-10%;

calculation of the deflections of a three-layer plate for the action of fixed but dynamic and moving loads was introduced by SVP MASKAN LLC on the process of preventing excessive reinforcement of plates with a dense layer of reinforcement (certificate of the Ministry of Construction of the Republic of Uzbekistan No. 1186 / 30-01 of June 8, 2018). As a result, the stress-strain state of the floor slabs was calculated taking into account their three-layer nature made it possible to reduce the weight of the structure by 7%.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

1. Xudayberdiyev Z., Isroilov Sh., Axatov X. Ikki qatlamli elastik plastinka simmetrik tebranishlari // Memorchilik va qurilish muammolari ilmiy-texnik jurnali. - 2019 №1. – 133-136 b. (05.00.00, №14.).

2. Khudoynazarov Kh., Khudoyberdiyev Z., Khudoyberdiyeva Sh. Symmetrical Vibrations of a Three-Layer, Longitudinally Covered Plate // Int. Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 5, Issure 10, March 2018. – P. 7116-7121. (05.00.00, №8.).

3. Халмурадов Р.И., Худойназаров Х., Худайбердиев З. Нестационарные колебания трёхслойной вязкоупругой пластинки // Журнал СамГУ «Научный вестник». – 2018, №1. – С.30-38. (01.00.00, №2).

4. Xudoynazarov X., Xudayberdiyev Z., Xudayberdiyeva Sh. Xususiy ko’rinishdagi uch qatlamli plastinkaning bo’ylama tebranish tenglamalari // Memorchilik va qurilish muammolari ilmiy-texnik jurnali. – 2017, №2. – 140-142 b. (05.00.00, №14.).

5. Халмурадов Р.И., Худойназаров Х., Худайбердиев З. Свободные колебания упругой трёхслойной пластинки // Узбекский журнал Проблемы механики. – 2017, №2-3. – С.46-52. (01.00.00, №4).

6. Худайбердиев З.Б. Свободные колебания упругой пластинки // XXI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации», 12 марта 2019 г., г.Пенза, Россия. – С.36-41.

7. Худойназаров Х., Худайбердиев З. Математическая модель симметричных колебаний трехслойной, свободно опертой пластины // International conference “Mathematical analysis and its application to mathematical physics” Samarkand state university 17-20 september. 2018 y. P. - 144.

8. Худайбердиев З., Худайбердиева Ш. Икки қатламли композит пластинканинг тебранишлари // “Таьлим, фан ва ишлаб чиқариш интеграциясида инновацион технологияларни қўллаш мамлакат тараққиётининг муҳим омили” Самарканд давлат архитектура-курилиш институти. 2-3–июн. 2018 й., II-қисм 117-б.

9. Худайбердиев З., Пулатов Ж. Уч қатламли эластик пластинканинг симметрик тебранишлари дифференциал тенгламалари// “Новые результаты математики и их приложения” Самаркандский государственный университет 14-15 мая. 2018 г. 108-с.

10. Худайбердиев З., Қуралов С. Икки қатламли эластик пластинканинг бўйлама тебранишлари // “Таьлим, фан ва ишлаб чиқариш интеграциясида интелектуал салоҳиятли ёшлар мамлакат тараққиётининг муҳим омили” Самарканд давлат архитектура-курилиш институти. 27–май. 2017 у., II-қисм 186-б.

11. Худойназаров Х., Худайбердиев З., Қуралов С. Уравнения продольных колебаний трёхслойной вязкоупругой пластинки // International Conference “Nonlinear analysis and its applications”. Samarkand State University September 19-21. 2016, 161-б.

12. Худайбердиев З., Холиков Д. Туртбурчакли пластинканинг тебраниши натижасида юзага келадиган кучишлар // “Касб-ҳунар коллежларида таьлим жараёнини такомиллаштириш муаммолари”., Самарканд давлат архитектура-қурилиш иниститути. 25–май. 2016 й. I-кисм 114-б.

13. Худайбердиев З., Холиков Д. Қалинлиги ўзгарувчан пластинканинг ностационар тебранишлари // “Касб-ҳунар коллежларида таьлим жараёнини такомиллаштириш муаммолари”., Самарканд давлат архитектура-қурилиш иниститути. 25–май. 2016 й. I-кисм 117-б.

Автореферат Самарқанд давлат университетининг
“СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси” журнали таҳририятида
таҳрирдан ўтказилди (09.11.2019 йил).

Гувоҳнома: №10-3512

2019 йил 11 ноябрда босишга рухсат этилди:
Офсет босма қоғози. Қоғоз бичими $60\times84_{1/16}$.
“Times” гарнитураси. Офсет босма усули.
Ҳисоб-нашриёт т.: 2,8. Шартли б.т. 2,1.
Адади 100 нусха. Буюртма № 11/11.

СамДЧТИ нашр-матбаа марказида чоп этилди.
Манзил: Самарқанд ш, Бўстонсарой кўчаси, 93.