

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

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

АБДИРАШИДОВ АБЛАКУЛ

**ҚУРИЛМАЛАР НОЧИЗИҚЛИ ДЕФОРМАЦИЯЛАНУВЧАН
ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ СУЮҚЛИК БИЛАН
ЎЗARO НОСТАЦИОНАР ТАЪСИРИ**

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАН ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Физика-математика фанлари бўйича фан доктори (DSc)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора наук (DSc) по физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of the doctor of sciences (DSc)
on physical-mathematical sciences**

Абдирашидов Аблакул

Қурилмалар нозиклиги деформацияланувчан элементларнинг суюқлик
билан ўзаро ностационар таъсири3

Абдирашидов Аблакул

Нестационарное взаимодействие нелинейно деформируемых элементов
конструкций с жидкостью29

Abdirashidov Ablakul

Non-stationary interaction nonlinear deformable elements of constructions with a
liquid55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works59

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

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

АБДИРАШИДОВ АБЛАКУЛ

**ҚУРИЛМАЛАР НОЧИЗИҚЛИ ДЕФОРМАЦИЯЛАНУВЧАН
ЭЛЕМЕНТЛАРИНИНГ СУЮҚЛИК БИЛАН
ЎЗARO НОСТАЦИОНАР ТАЪСИРИ**

01.02.04 – Деформацияланувчан қаттиқ жисм механикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАН ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Самарқанд – 2018

Физика-математика фанлари бўйича фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.3.DSc/FM82 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

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

Илмий маслаҳатчи:

Худойназаров Хайрулла
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Мардонов Ботир
физика-математика фанлари доктори, профессор

Абдусатторов Абдусамад
техника фанлари доктори, профессор

Абиров Рустам Абдуллаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институти.

Диссертация ҳимояси Самарқанд давлат университети ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc30.08.2018.FM/T.02.09 рақамли илмий кенгашнинг 2019 йил «5» январь куни соат 14:00 даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 140104, Самарқанд ш., Университет ҳиёбони, 15. Тел.: (8366) 2351938. Факс: (8366) 2351938. E-mail: sasu_info@edu.uz).

Диссертация билан Самарқанд давлат университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (№78 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 140104, Самарқанд ш., Университет ҳиёбони, 15. Тел.: (8366) 2351938. Факс: (8366) 2351938.

Диссертация автореферати 2018 йил «21» декабрь куни тарқатилди.
(2018 йил «21» декабрдаги 1-рақамли реестр баённомаси).



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

Б.Хўжаёров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш котиби, ф.-м.ф.д., профессор

К.Исмаилов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, т.ф.д., доцент

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон миқёсида атом, нефть ва аэрокосмик инфратузилмалари ривожланган мамлакатларида температура, сейсмик ва техноген юкланишлар таъсири остидаги ҳар хил резервуарлар ва қувурларнинг фазали ҳолати ўзгарувчан суюқликлар билан динамик ўзаро таъсир этишининг такомиллашган лойиҳасини ишлаб чиқиш етакчи ўринни эгалламоқда. Бу борада, жумладан АҚШ, Россия, Франция, Англия, Хитой, Германия, Япония ва бошқа етакчи давлатларда «...жаҳон бўйлаб қурилаётган атом станциялари, ташувчи ракеталарни учириш, нефть маҳсулотларини ташиш ва сақлаш қурилмаларини қуришнинг 80 фоиздан ортигини ташкил этмоқда. Ушбу инфратузилмаларнинг нормал фаолиятини таъминлаш учун ҳар йили жаҳонда бир неча юз миллиард АҚШ доллари сарфланади...»¹. Шу жиҳатдан термогидроэластиклик жараёнларида энергия сиғимини камайтириш ва ресурсларни сақлаш, хавфли портловчи суюқлик ва газларни (масалан, метастабил ва криоген суюқликларни) ташувчи воситалар сифатига талабни кучайтириш, уларнинг ишончлилиги ва хавфсизлигини таъминлашга йўналтирилган янги технологияларни яратишнинг самарали услублари асосида лойиҳалаш усуллари такомиллаштиришга алоҳида эътибор қаратилган.

Жаҳонда ҳар хил услубда олинаётган металл ва қотишмаларнинг олдиндан берилган параметрлари, мураккаб физик-механик характеристикалари асосида плита, пластинка, қобик, резервуар ва қувурларнинг мустаҳкамлигини ошириш ва сифат кўрсаткичларини яхшилаш мақсадида такомиллаштирилган математик моделлар ва ҳисоб усуллари қўлланилмоқда. Бу борада мақсадли илмий-тадқиқотларни, жумладан, суюқликлар ва қурилмалар элементларининг механик хоссалари ва сифат кўрсаткичларини ҳисобга олган ҳолда уларнинг асосий параметрларини аниқлашнинг замонавий услубларини ишлаб чиқиш, қурилмалар эластик ва эластик-қайишқоқ деформацияланувчан элементларининг метастабил ва криоген суюқликлар билан ностационар ўзаро таъсирлашиши ҳисобининг янги самарали усуллари ишлаб чиқишнинг илмий асослари яратилмоқда. Ушбу соҳада, жумладан пластинка ва қобикларнинг портловчи хавфли суюқлик ва газлар билан ночизикли ўзаро таъсирлашишининг хавфсизроқ режимларини ифодаловчи янги математик моделлар, ЭҲМ учун алгоритм ва дастурларни ишлаб чиқиш зарур ҳисобланади.

Республикамизда нефть-газ соҳасига ҳамда узоқ масофага газ ва нефть ташувчи қувурлар ўтказилишига катта эътибор қаратилиб, мазкур йўналишда амалга оширилган дастурий чора тадбирлар асосида, жумладан нефть ва газ ташувчи резервуар ва қувурларнинг мустаҳкамлигини ошириш ва замонавий технологияларни қўллаш туфайли муайян натижаларга эришилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича

¹ Мехдиев Э.Т. Обзор трубопроводной инфраструктуры Европы: транспортировка нефти и нефтепродуктов // Энергетический вестник, №1, 2016. - С.108-119. Российское энергетическое агентство (РЭА), Международное энергетическое агентство (МЭА), <http://www.sci-books.org/>, <http://e-notabene.ru/energetika> ва б.

Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...ишлаб чиқаришни модернизация қилиш, техник ва технологик янгилаш, ишлаб чиқариш, транспорт-коммуникация ва ижтимоий инфратузилма лойиҳаларини амалга ошириш..., ...замонавий тежамкор ва самарали замонавий технологияларни босқичма-босқич жорий этиш...»¹ вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан маҳсулот сифатини ошириш, замонавий интеллектуал технологияларни қўллаш, газ ва нефтни қайта ишловчи корхоналарни ривожлантириш, ички бозорни тўлдирган ҳолда хом-ашё маҳсулотлари захираларини экспорт қилиш учун иккиламчи синтетик маҳсулотлар оптимал таркиби технологияларини, ушбу жараёнларни ифодаловчи такомиллашган математик моделлар ва алгоритмларни яратиш муҳим масалалардан 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», 2017 йил 30 июндаги ПҚ-3107-сон «Нефть ва газ саноатини бошқариш тизимини такомиллаштириш тўғрисида», 2017 йил 8 ноябрдаги ПҚ-3379-сон «Энергия ресурсларидан оқилона фойдаланишни таъминлаш чора тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи². Қурилмаларнинг суюқлик ва газ билан ўзаро таъсирлашишини аниқлаш, қаттиқ жисмларнинг суюқлик ва газда ҳаракати ҳисоб усулларини ишлаб чиқиш, атроф муҳитни ҳисобга олган ҳолда уларнинг динамик мустаҳкамлигини ҳамда пластинка ва қобиклар материаллари механик характеристикалари ўзгаришининг гидроэластик тизим ҳолатига таъсирини аниқлашга йўналтирилган кенг қамровли илмий изланишлар жаҳоннинг олий таълим муассасалари ва етакчи илмий марказларида, жумладан Калифорния

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

² Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи 1. Galiev Sh.U., Flay R.G.J. Interaction of breaking waves with plates: The effect of hull cavitation Ocean Engineering 88 (2014) 27–33. 2. Избранные труды по гидроупругости и динамике упругих конструкций / Шмаков В.П. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 287 с. 3. Волны в сплошных средах / А.Г.Горшков и др. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 472 с. 4. Динамика конструкций гидроаэроупругих систем /К.Ф.Фролов и др. - М.: Наука, 2002. - 397 с., www.elsevier.com, www.scopus.com, www.springer.com, www.sciencedirect.com, www.mathnet.ru, www.elibrary.ru, www.math.msu.ru, www.webofsciences.com, <http://sci-hub.cc> ва бошқа манбалар асосида бажарилган.

университети (АҚШ), Европа комиссиясининг Бирлашган тадқиқотлар маркази (Бельгия), Окланд университети (Янги-Зеландия), Москва давлат университети, Москва авиация институти, Н.Э.Бауман номидаги Москва давлат техника университети, Санкт-Петербург давлат университети (Россия), Украина Миллий ФАнинг Амалий механика ва Мустаҳкамлик муаммолари институтлари (Украина), Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти, Тошкент давлат техника университети ва Самарқанд давлат университети (Ўзбекистон) томонидан олиб борилмоқда.

Газ, суюқ ва деформацияланувчан қаттиқ жисмларнинг ностационар ўзаро таъсирлашиши жараёнларининг математик модели, алгоритми ва дастурларини такомиллаштиришга оид жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги натижалар олинган: вакуумда портлаш натижасида қаттиқ жисмларнинг эластик-қайишқоқ оқиши ва емирилиши ҳисоблаш усули яратилган (Калифорния университети, АҚШ); нефть ва газ соҳасидаги хавфли моддаларни ташишга мўлжалланган қувурлар тизимининг муҳит билан ўзаро таъсирлашиши математик модели ишлаб чиқилган (Европа комиссиясининг Бирлашган тадқиқотлар маркази, Бельгия); суюқлик фазавий ҳолатининг ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда ҳалокатли ночизикли тўлқин ҳодисалари математик модели ишлаб чиқилган (Окланд университети, Янги-Зеландия); қаттиқ жисмлар, қурилмалар ва қўп фазали муҳитларда динамик жараёнлар, жисмлар суйрилигининг кавитацион режими масалалари аналитик ва сонли ечилган (Москва давлат университети, Россия); қурилмалар ностационар аэрогидроэластиклигининг математик модели ишлаб чиқилган (Москва авиация институти, Россия); гидроэластик қурилмаларда ночизикли тўлқин динамикаси ўрганилган (Н.Э.Бауман номидаги Москва давлат техника университети, Россия); қурилмалар ностационар термогидроэластик, гидроэластик тебранишлари ва устуворлиги масалалари ечилган (Санкт-Петербург давлат университети, Россия); деформацияланувчан жисмларнинг суюқлик ва газда ҳаракатини ҳисоблаш усуллари ишлаб чиқилган (Амалий механика институти, Украина); пластинка ва қобиклар материаллари механик характеристикалари ўзгаришининг гидроэластик тизим элементлари ҳолатига таъсири масалалари ечилган (Мустаҳкамлик муаммолари институти, Украина); ер ости коммуникацияларининг тупроқ билан ўзаро таъсирлашиши ва гидроэластик тизимлар сейсמודинамик назарияси яратилган (Механика ва иншоотларнинг сейсмик мустаҳкамлиги институти, Ўзбекистон); гидроэластик қурилмаларда ночизикли тўлқинлар динамикаси масалалари ечилган (Тошкент давлат техника университети ва Самарқанд давлат университети, Ўзбекистон).

Дунёда қурилмалар элементларининг оддий, метастабил ва криоген суюқликлар билан ўзаро ностационар таъсирлашишига оид математик моделлар, алгоритмлар в дастурлар яратиш бўйича катор, жумладан қуйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: қурилмалар эластик ва эластик-қайишқоқ деформацияланувчан элементларининг суюқлик билан ностационар ўзаро таъсирининг математик моделини ишлаб чиқиш; суюқликдаги кавитация, пуфакчали кавитация ва қайнашнинг ўзаро

таъсирлашаётган элемент ночизикли деформацияланиши ва емирилишига таъсири масалаларини сонли ечиш; импульсли ва гидродинамик юкланиш таъсирида қобикларнинг ночизикли деформацияланиши масаласини ечиш; суюқликда ёки муҳитда портловчи модда портлашининг у билан ўзаро туташ бўлган жисмнинг эластик-қайишқоқ ҳолатига таъсири масаласини сонли ечиш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Дунё тажрибасида гидроэластик-қайишқоқликнинг асосий муаммолари таркибига қурилмаларнинг суюқлик ва газ билан ўзаро таъсирлашиши, деформацияланувчи қаттиқ жисмларнинг суюқлик ва газдаги ҳаракати ҳисоби, атроф муҳит таъсирида уларнинг динамик мустаҳкамлигини аниқлаш, пластинка ва қобиклар материаллари механик характеристикалари (жумладан, қовушоқ-эластиклиги, қайишқоқлиги ва бошқа) ўзгаришининг улар тебранишига таъсири, қаттиқ жисмларда, қурилмаларда ва кўп фазали муҳитларда динамик жараёнлар, жисмлар суйрилигининг кавитацион режимини аналитик ва сонли таҳлил қилиш бўйича M.L.Wilkins, G.Maenchen, S.Sack, M.Amabili, A.D.Lucey, J.W.Kim, X.A.Рахматуллин, А.С.Вольмир, Ш.У.Галиев, А.Г.Горшков, Э.И.Григолюк, А.Н.Гузъ, Б.В.Замышляев, В.Д.Кубенко, М.А.Ильгамов, А.К.Перцев, Л.И.Слепян, В.Г.Баженов, Ю.С.Яковлев ва бошқа олимлар томонидан кенг қамровли илмий тадқиқотлар олиб борилган.

Ер ости коммуникацияларининг тупроқ билан ўзаро таъсирлашиши ва гидроэластик тизимларнинг сейсמודинамикасини ўрнанишнинг замонавий усуллари ишлаб чиқишда бир қатор ўзбек олимлари, жумладан, М.Т.Ўразбоев, Т.Р.Рашидов, Т.Ширинкулов, Т.Мавлонов, Б.Мардонов, К.С.Султанов, М.Мирсаидов, Х.Худойназаров ва бошқа олимлар илмий ишларида ўрганилган ҳамда маълум даражадаги ижобий натижаларга эришилган.

Амалга оширилган кўплаб илмий тадқиқотларда юқори ҳароратли ва криоген суюқликлар фазавий ҳолати ўзгаришининг, улар эластик-қайишқоқ деформацияланувчан қобиклар билан ўзаро ностационар таъсирлашиши жараёнида, резервуарлар ва қувурлар динамик мустаҳкамлигига таъсири ҳисобга олинмаган. Жумладан, экстремал шароитдаги иккита муҳит (бири метастабил ҳолатдаги суюқ ва иккинчиси мустаҳкамлигини йўқотиш ҳолатига яқин бўлган эластик-қайишқоқ деформацияланиш ҳолатидаги қаттиқ жисм)нинг ўзаро таъсири билан боғлиқ тадқиқотлар олиб борилмаган. Бундан ташқари, гидроэластик-қайишқоқ тизимларда пайдо бўладиган критик ҳодисаларнинг қурилмалар қобиксимон элементлари мустаҳкамлигига таъсирини тадқиқ қилиш етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Самарқанд давлат университетининг илмий тадқиқот ишлари режасининг №19.11 «Деформацияланувчи муҳит билан таъсирлашувчи дискрет-услуксиз тизимлар тебраниши ва турғунлигини тадқиқ қилиш» ва №19.12 «Муҳандислик ва табиий жараёнларнинг

математик моделларини тузиш ва сонли тадқиқ қилиш» (2000-2018) ҳамда №26/99 «Қовушоқ ва метастабил суюқликлар билан таъсирлашишгаётган цилиндрик қатлам ва қобикларда ностационар тўлқинларнинг тарқалишини тадқиқ қилиш» (1999-2003), №21/41 «Қурилмалар элементларининг регуляр ва нерегуляр структурали муҳитлар ва боғламли майдонлар билан таъсирлашишини тадқиқ қилиш» (2007-2011) мавзудаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади қурилмалар эластик-қайишқоқ деформацияланувчан ва емирилувчан элементлари (қобик, пластинка ва плита)нинг ночизикли деформацияланиши жараёнида фазавий ҳолатини ўзгартирувчи суюқ муҳит ва газ билан ностационар ўзаро таъсирлашиш муаммосини математик моделлаштириш ва сонли ечишдан иборат.

Тадқиқот вазифалари:

қурилмалар элементлари (қобик, пластинка ва плита)нинг метастабил ва криоген суюқликлар билан ўзаро динамик таъсирлашишини тадқиқ қилиш;

чекли ҳажмни эгаллаб турган суюқликда берилган гидродинамик юкланиш таъсирида пайдо бўладиган қайишқоқ деформацияланувчан қурилмалар элементларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини аниқлаш;

ғайритабiiй ҳодиса, яъни метал пластинканинг таъсир этувчи куч йўналишига қарама-қарши йўналишда пайдо бўладиган сезиларли қолдиқ деформацияси қайд этилган масалани тадқиқ қилиш;

қурилмалар элементларида уларнинг ўзгарувчан, динамик ривожланувчан ва янги фазалари пайдо бўлувчи суюқликлар билан таъсирлашаётгандаги динамик деформацион жараёнлари масалаларини сонли ечиш.

ер ва сув ости қувурлари мустаҳкамлигини гидроиншоотлар тўлқин назарияси асосида ҳисоблашнинг сонли ҳисоблаш услуби ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида битта ёки қўш ўқли чекли ва чексиз узунликдаги цилиндрик қобиклар, чексиз узунликдаги силлиқ ва пиллапояли пластинка ва қобиклар, оддий, пуфакчали, метастабил ва криоген суюқликлар олинган.

Тадқиқотнинг предмети ташқи импульсли юкланишлар ва ички босим тўлқинлари манбаи таъсирида ночизикли деформацияланувчан ва қайишқоқ юпқалашувчан ягона ва қўш ўқли цилиндрик қобиклар ва эластик-қайишқоқ пластинка ва плиталарнинг пуфакчали, метастабил ва криоген суюқликлар билан ўзаро таъсирлашишининг ўзгариш қонуниятларини ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида гидроэластик қурилмаларнинг динамик мустаҳкамлигини аниқлашда чекли айирмалар усули, туташ муҳитлар механикаси ва гидродинамика усуллари, қобик ва пластинкалар назариясининг асосий тенгламаларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

динамик юкланган эластик-қайишқоқ деформацияланувчан қувурларнинг метастабил ва криоген суюқликлар билан ўзаро таъсирлашишнинг самарали ҳисоблаш модели ишлаб чиқилган;

кувурларнинг бир қисми (нефть-газ кувурлари), нефть ва конденсатларни сақловчи резервуарларнинг қайишқоқ деформацияланувчанлик ва пластик юпқалашиш соҳалари гидроэластик тизимлардаги ночизикли тўлқин масалаларини ечиш орқали аниқланган;

металл пластинканинг таъсир этувчи куч йўналишига қарама-қарши йўналишда қолдиқ деформацияси пайдо бўлиши гидроэластиклик масаласини (пластинка, суюқлик ва тезкор кенгайувчи газ пуфакчасининг ўзаро ностационар таъсири масаласини) сонли ечиш орқали аниқланган;

кувурлар ва гидроиншоотлар деворларининг ночизикли деформацияланиши жараёнида метастабил ва криоген суюқликларда қайнаш (яъни динамик ривожланувчи ва янги фазалари пайдо бўлувчи) соҳаларининг мавжудлиги ностационар гидроэластик-қайишқоқлик масалаларини сонли ечиш орқали аниқланган;

гидроиншоотлар тўлқин назарияси асосида ер ва сув ости кувурлари мустаҳкамлигини ҳисоблашнинг сонли ҳисоблаш услуби ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

гидроэластик тизим элементларидан самарали ва ишончли фойдаланиш, уларнинг синов муддатларини ва моддий-техник харажатларини камайтириш сонли ҳисоб услубини ишлаб чиқиш асосида илмий тадқиқот ва технологик ишлари натижалари бўйича илмий-техник ишланмалар ишлаб чиқилган;

ишлаб чиқилган гидроэластик-қайишқоқлик сонли ҳисоби ёрдамида газ қузури материали мустаҳкамлиги шартининг бажарилиши техник талабларга жавоб берувчи алгоритмлар ишлаб чиқилган;

кувурдаги пластик юпқалашиш соҳаларини аниқлаш орқали бузилишларга олиб келувчи ҳолатларнинг олдини олиш имкони аниқланган ва бу орқали газ қувурларининг ихтиёрий кесимидаги нуқтада таъсир этувчи кучланиш қиймати аниқланган;

хар хил муҳитлар ўзаро ночизикли таъсирининг ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритми ёрдамида қувурни ётқизишнинг оптимал сатҳи аниқланган ва қувурнинг деформацияланувчи муҳит билан ўзаро ночизикли таъсири масалалари сонли ечилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги гиперболик типдаги хусусий ҳосилали дифференциал тенгламалар системасини ечишнинг ишончли ва текширилган математик усулларида фойдаланган ҳолда туташ муҳит механикаси, пластинка ва қобиклар назарияси, гидродинамика тенгламалари математик ифодаларининг аниқ қўлланилганлиги, олинган натижалар ҳодисанинг физик маъносига қарама-қарши эмаслиги ва улар, хусусий ҳолда, бошқа муаллифларнинг маълум натижалари асосида таққосланганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти экстремал шароитдаги суюқлик билан ўзаро таъсирлашаётган қурилмалар қобиксимон элементларининг эластик-қайишқоқ деформацияланиши назариясини ривожлантириш, суюқликларнинг метастабиллиги ва криогенлигини ҳамда элементларнинг қайишқоқ юпқаланишини ҳисобга олувчи самарали ҳисоб моделларни ишлаб чиқиш, амалий масалаларни ечишда олинган натижаларнинг қўлланилиши

учун кенг база яратиш, яратилган усулларни қаттиқ, суюқ ва газсимон муҳитлар ўзаро таъсири механикасининг турдош масалалари ва гидроэластик-қайишқоқликнинг мураккаб масалаларига қўллаш мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти илмий асосланган лойиҳалар ҳамда қисқа муддатли ва импульсли юкланиш таъсири шароитида эксплуатация учун мўлжалланган ва ҳар хил суюқлик ва газларни ўз ичида сақловчи ва ташувчи ер ва сув ости қурилмалари ва ҳар хил ҳажмдаги резервуарлар ҳисоби учун зарурий йўл-йўриқлар ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг ишлаш муддатини узайтириш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларнинг жорий қилиниши. Қурилмалар ночизикли деформацияланувчан элементларининг суюқлик билан ўзаро ностационар таъсири бўйича ишлаб чиқилган ҳисоблаш усуллари, алгоритмлар ва дастурлар натижалари асосида:

газ қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати ҳисобининг лойиҳа сифатини ошириш, объектлардан самарали ва ишончли фойдаланиш, синов муддатларини ва моддий-техник харажатларни камайтиришнинг сонли ҳисоб услуби «Ўзбекнефтгаз» АЖ тасарруфидаги корхонада, хусусан «Муборакнефтгаз» МЧЖ корхонасига жорий этилган («Ўзбекнефтгаз» АЖнинг 2018 йил 7 майдаги 02/12-1-92-сон маълумотномаси). Натижада илмий тадқиқот натижасида синов-қурилма ва технологик ишлар бўйича математик модел, сонли ҳисоб алгоритми ва дастурга асосланган илмий-техник тавсиялар газ қувурлари системаси мустаҳкамлиги ва системанинг ишдан чиқиш эҳтимоллигини олдиндан аниқлаш молиявий сарф-харажатларни 10-14 фоизгача камайтириш имконини берган;

қумлоқ муҳитга ётқизилган газ қувурларининг деформацияланганлик-кучланганлик ҳолатини ҳисоб усуллари «Ўзбекнефтгаз» АЖ тасарруфидаги корхонада, хусусан «Муборакнефтгаз» МЧЖ корхонасининг КС ва ИЛ бўлимларида «Денгизкуль-МГПЗ» лойиҳаш жараёнларига жорий қилинган («Ўзбекнефтгаз» АЖнинг 2018 йил 7 майдаги 02/12-1-92-сон маълумотномаси). Натижада қумлоқ муҳитга ётқизилган газ қувурларининг деформацияланганлик ҳолатини баҳолаш ва қабул қилинган даражадаги ишончилиқни сақлаган ҳолда якуний натижада сарф-харажатларни 10 фоизгача камайтириш имкони яратилган;

газ қувурлари материали мустаҳкамлиги шартининг бажарилиши текширилиб, газ қувурларининг ихтиёрий кесимидаги нуқтада таъсир этувчи кучланиш қийматини аниқлашнинг математик ифодаси «Муборакнефтгаз» МЧЖ корхонасидаги КС ва ИЛ бўлимда техник ҳисоблашлар жараёнларига жорий қилинган («Ўзбекнефтгаз» АЖнинг 2018 йил 7 майдаги 02/12-1-92-сон маълумотномаси). Натижада қувурдаги пластик юпқалашиш соҳаларини аниқлаш орқали бузилишларга олиб келувчи ҳолатларнинг олдини олиш ва тизимнинг беҳосдан ишдан чиқиш эҳтимоллигини 12-14 фоизга камайтириш имконини берган;

газ қувурини ётқизишнинг оптимал сатҳини аниқлаш бўйича қувурнинг деформацияланувчи муҳит билан ўзаро нозичиқли таъсирини эътиборга олиш ҳисобини бажарувчи математик модел, алгоритм ва дастур ««Денгизкуль-МГПЗ» газ қувурларининг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолати ҳисоби» мавзудаги техник топшириғини бажаришда амалиётга жорий қилинган («Ўзбекнефтгаз» АЖнинг 2018 йил 7 майдаги 02/12-1-92-сон маълумотномаси). Натижада меҳнат харажатлари ҳажмини 12-14 фоизга камайтириш имкони яратилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 7 та халқаро ва 3 та республика илмий анжуманларида муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 30 та илмий ишлар чоп этилган, шулардан, 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фан доктори (DSc) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 10 та илмий мақола, жумладан, 7 таси республика, 3 таси хорижий журналларда нашр этилган ҳамда 2 та ЭҲМ учун яратилган дастурий воситалар учун гувоҳномалар (№DГУ 00893, №DГУ 00894) олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, олтита боб, хулосалар, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 193 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган, объект ва предмети тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий назарий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижалари амалиётга жорий қилинган, илмий ишлар нашр этилган, диссертация тузилиши ва ҳажми бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертация ишининг «**Қурилмалар элементларининг суюқлик билан ўзаро таъсири. Муаммонинг ҳолати ва асосий муносабатлар**» деб номланган биринчи бобида қаралаётган муаммонинг ҳолати ва кейинчалик масалаларни ечишда қўлланиладиган туташ муҳит механикаси ва пластик деформацияланувчан ётиқ қобиклар назариясининг асосий муносабатларини ёритишга бағишланган.

Биринчи бандда қурилмалар элементларининг суюқлик билан ўзаро таъсирини тадқиқ қилишга бағишланган ишлар шарҳи келтирилган. Шарҳда сув ости тўлқинлари, импульсли юкланиш таъсирида қобикларнинг ностационар деформацияланиши, эластик-қайишқоқ жисмлар ва суюқликларнинг динамик емирилиши, оддий, метастабил ва криоген суюқликларнинг гидроэластик-қайишқоқ деформацияланувчан элементлар билан ўзаро ностационар таъсирлашиши ҳолатини тадқиқ қилиш,

емирилувчан мухит ва қобиклар учун газогидоэластик-қайишқоқлик масалаларини ечишга у ёки бу маънода тегишли муаммоларга асосий эътибор берилган.

Иккинчи бандда мухит параметрларининг кенг диапазонли ўзгаришида, шу билан бирга унинг суёқ ва газсимон ҳолатларида ҳам, ўринли ҳолат тенгламалари ва туташ мухит механикасининг муносабатлари келтирилган.

Учинчи бандда қайишқоқ деформацияланиши ҳисобга олинувчи ётиқ қобикларнинг геометрик нозичиқли ҳаракат тенгламаси икки хил вариантда: Кирхгоф-Ляв модели ва Тимошенко модели кўринишида чиқарилган. Бунда кўчиш ва деформация орасидаги боғланиш қобикнинг радиал кўчишларидан, координат чизиклари бўйича кўчишнинг ўзгаришидан пайдо бўлувчи ва эгилиш деформацияларига мос келувчи деформацияларни ҳисобга олади.

Гидроэластиклик соҳасидаги тадқиқотларнинг ҳозирги босқичидаги ривожланишида энг муҳим йўналишлар қуйидагилар: муҳандислик қурилмалар қобиксимон ва пластинкасимон элементларининг ўзида газ пуфакчаларини сақлаган ёки қурилманинг деформацияланиши жараёнида қайновчи суёқлик билан ўзаро таъсирлашиши масалаларини ўрганиш; суёқ мухит билан ностационар таъсирлашишаётган пластинка ва қобикларнинг импульсли деформацияланишини тадқиқ қилишда сонли усулларни, хусусан амалий тадқиқда қўлланилиши қулай ва самарали, рационал бўлган М.Уилкинс айирмали схемасидан фойдаланиш мақсадга мувофиқ; кейинги бир неча ўн йилликда чоп этилган кўпгина назарий ва экспериментал тадқиқотларни таққослаш таҳлили чизикли назария асосий хулосаларининг тўғрилигини кўрсатади. Шу билан бирга, деформацияланувчи жисмларнинг суёқлик билан ўзаро таъсирлашиши жараёнида сифат жиҳатидан янги ҳодисалар кузатиладики, уларни чизикли назарияси доирасида тушунтириш мумкин эмас. Шунинг учун кўрсатилган масалалар синфини ечишда кўпроқ физик-механик, хусусан қайишқоқлик ва температуравий хоссаларни ҳисобга олган ҳолда нозичиқли моделларни қўллаш мақсадга мувофиқ.

Диссертация ишининг **«Ностационар гидроэластик-қайишқоқлик масалаларини моделлаштириш»** деб номланган иккинчи бобида ностационар гидроэластик-қайишқоқликнинг диссертация доирасида тадқиқ қилинаётган масалалари математик тузилиши берилган, суёқлик билан ўзаро таъсирлашаётган пластинка ва қобикларнинг қайишқоқ деформацияларини ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган. Ҳар хил эластик-идеал, кавитацияланувчи, пуфакчали, қайновчи ва криоген суёқликларни таққослаш таҳлили ўтказилган. Эластик-қайишқоқ деформацияланувчан юпқа деворли қурилма элементининг емирилишини ҳисобга олувчи содда модел ва пуфакчали суёқликнинг янги ҳисоб модели таклиф этилган. Ҳажмининг бир чеккасидан чайқалиш берилиши натижасида кўзгалувчан суёқликнинг бир ўлчовли тебраниши ўрганилган.

Биринчи бандида ностационар гидроэластик-қайишқоқликнинг диссертация иши доирасида кейинги бандларда ечиладиган умумий масаласи қўйилиши тузилган. Бу масалалар қурилмалар элементларининг суёқлик

билан ўзаро таъсири муаммосининг қуйидаги иккита асосий йўналишига қаратилган:

а) Суюқлик билан ўзаро таъсирлашишдаётган пластинканинг шакл ўзгариши ва емирилишини ва унинг гидродинамик юкланишга реакциясини тадқиқ қилиш; пластинка ва плитанинг шакл ўзгариши ва емирилиши амалий масалаларини моделлаштириш; бошқа муаллифлар аниқлаган экспериментал эффектларни, хусусан, натижаларни таққослаш таҳлили учун акад. М.А.Лаврентьев раҳбарлигида ўтказилган эксперимент натижаларини сонли моделлаштириш.

б) Температура режимида оддий, юқори ҳароратли қиздирилган ва криоген суяқликлар кавитацион қайнашининг эластик-қайишқоқ деформацияланувчан плита, пластинка ва қобиклар ностационар ҳолатига таъсирини тадқиқ қилиш. Бу масалаларни бажариш учун ичма-ич жойлашган ва суяқлик билан ажратилган иккита чексиз узунликдаги цилиндр олинган. Бу қурилманинг ички ёки ташқи сиртига импульсли ёки гидродинамик юкланиш қўйилган.

Учта муҳит (деформацияланувчи қатик жисм, суяқлик, газ)нинг ўзаро таъсирини тавсифлаш учун туташ муҳитнинг қуйидаги тенгламалари системаси қўлланилган: массанинг сақланиш тенгламаси $\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \bar{v} = 0$;

импульснинг сақланиш тенгламаси $\rho \frac{dv_i}{dt} = \nabla_j \sigma_{ij} + \rho F_i$, ($i, j=1, 2, 3$), бунда ρ - муҳитнинг зичлиги; $\bar{v}$ - тезлик вектори; v_i - тезлик вектори компоненталари; σ_{ij} - кучланиш тензори компоненталари ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$); F_i - ташқи муҳитларнинг объектга таъсирини ифодаловчи массавий кучлар.

Деформациялар тезликлари тензори компоненталари заррачалар тезликлари билан Коши муносабатлари орқали боғланган.

Кучланиш тензорини ҳисоблаш Гук қонуни асосида амалга оширилади:

$$\frac{d}{dt} s_{\alpha\alpha} = 2\mu \left(\frac{d}{dt} \varepsilon_{\alpha\alpha} - \frac{1}{3V} \frac{dV}{dt} \right), \quad (\alpha = z, r, \theta), \quad \frac{d}{dt} \tau_{zr} = \mu \frac{d}{dt} \varepsilon_{zr},$$

бунда μ - силжиш модули. Эластик деформациядан қайишқоқликка ўтиш Мизеснинг оқувчанлик тенгламасидан берилади: $s_{zz}^2 + s_{rr}^2 + s_{\theta\theta}^2 + 2\tau_{zr}^2 = \frac{2}{3} \sigma_T^2$,

бунда σ_T - оддий чўзилишдаги оқувчанлик чегараси. Юкланишнинг шундай ҳолати қараладики, бунда туташ муҳит заррачасининг тўла ҳолати аниқланган бўлади, агар s_{ij} - кучланиш девиатори ва P - босим учун уларнинг e_{ij} - деформациялар тезликлари тензори компоненталари, $g_{\alpha\beta}$ - метрик тензор компоненталари ва T - температура ҳамда масаладан масалага ўзгарувчан $x_1, x_2, \dots, x_n$ - қўшимча параметрлар орқали $s_{ij} = s_{ij}(e_{\alpha\beta}, g_{\alpha\beta}, \rho, x_1, x_2, \dots, x_n)$, $P = P(\rho, T, x_1, x_2, \dots, x_n)$ ифодалари маълум бўлса, бунда $\sigma_{ij} = s_{ij} - P\delta_{ij}$, $P = -\sigma_{ij}/3$.

Ўзаро таъсир ва сийраклашиш соҳаларида қоришма икки компонентали бўлади – суяқлик ва газ, бунда қоришма бир жинсли туташ муҳит деб

қаралиб, унинг ўзига хос хоссалари ҳолат тенгламасида ва қовушоқмас иссиқлик ўтказмайдиган суюқлик ва газ моделида ҳисобга олинади.

Иккинчи банд эластик-қайишқоқ материалнинг емирилиши моделини тавсифлашга бағишланган. Бунда қобикларнинг динамик ҳолати юпқа қобикларнинг С.П.Тимошенко типдаги геометрик нозичли тенгламалари асосида тавсифланади: $A \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial t^2} = B \frac{\partial \bar{W}}{\partial r} + C \bar{W} + \bar{q}$, бу ерда $\bar{q}$ - ташқи кучлар вектори; $\bar{W} = \{u, w, \psi, N_1, N_2, M_1, M_2, Q\}$ - номаълумларнинг вектор устуни; A, B, C - ўзгармас матрицалар; N_i, M_i ($i=1,2$), Q - зўриқишлар, моментлар и қирқувчи кучлар; u, w - кўчишлар; ψ - кўндаланг кесимнинг бурилиш бурчаги. Қобик нуқталари-даги деформациялар қуйидагича топилади: $\varepsilon_i = \varepsilon_i^0 + z \varepsilon_i^1$, ($i=1,2$), $\varepsilon_{13} = 1,5 \varepsilon_{13}^0 (1 - 4z^2/h^2)$, бу ерда z - ўрта сиртдан нормаль координата ($-h/2 \leq z \leq h/2$); $\varepsilon_1^0, \varepsilon_2^0, \varepsilon_{13}^0$ - бўйлама, айланма деформациялар и ўрта сирт сатҳидаги кўндаланг силжиш деформацияси; $\varepsilon_1^1, \varepsilon_2^1$ - бурчак деформациялар. Деформацияланувчи қаттиқ жисм учун кучланишнинг шар қисмини ҳисоблашда ушбу адиабатик ҳолат тенгламаси қўлланилади: $P(\eta) = a(\eta - 1) + b(\eta - 1)^2 + c(\eta - 1)^3$, бунда σ (P босим) ўртача кучланиш ва ε (ρ зичлик) ўртача деформация орасидаги боғланиш ўрнатилади; $\eta = \rho_0 / \rho$; ρ_0 - материалнинг бошланғич зичлиги; a, b, c - материалнинг ўзгармаслари.

Учинчи бандда суюқ муҳитнинг динамик кавитацион ва пуфакчали емирилиш моделлари таҳлил қилинади. Ҳар бир муҳит учун (идеал-эластик, кавитацияланувчи, пуфакчали, қайновчи (Химпан ва Кузнецов тенгламалари), метастабил, криоген суюқликлар) ҳолат тенгламаси келтирилган.

Диссертация ишининг «Суюқлик билан ўзаро таъсирлашаётган цилиндрик ва сферик жисмларнинг динамик деформацияланиши» деб номланган учинчи бобида учта муҳит (газ, суюқлик, эластик-қайишқоқ деформацияланувчан жисм)нинг ўзаро таъсир масаласи ҳисоби алгоритми келтирилган; туташ муҳит механикаси ва эластик-қайишқоқ деформацияланувчан қобиклар ҳаракат тенгламаларини интеграллаш учун айирмалли тўрлар тузиш усули, икки ўлчовли сонли алгоритми, гидроэластик-қайишқоқликнинг масалаларини ечишни амалга оширувчи амалий дастурлар пакети тавсифланган. Қўлланилаётган математик модел ва сонли ҳисоб методикасининг ишончлилиги ва аниқлигини текшириш мақсадида аналитик ечимлари маълум бўлган бир нечта масалалар ечилган. Бунда ётиқ сферик ва доиравий кесимли цилиндрик қобикларнинг импульсли юкланиш таъсирида эластик, эластик-қайишқоқ деформацияланиши масалалари қаралган; ташқи импульс таъсирида цилиндрик қатламда тўлқин жараёнлари тадқиқ қилинган; сув ости портлаши манбаси остида сув ости зарбали тўлқинларининг пайдо бўлиши ва тарқалиши, уларнинг деформацияланмайдиган ва эркин чегаралардан қайтиш характерлари ўрганилган. Олинган натижалар бошқа тадқиқотчиларнинг илмий натижалари билан таққосланган.

Биринчи бандида тўсиқ билан суюқликнинг ностационар ўзаро таъсири масаласини сонли ечиш алгоритми таклиф этилган, бу иловаси учун муҳим

бўлган гидроэластик-қайишқоқлик масалаларини ечиш имконини беради. Хусусан, туташ муҳит механикасининг деформацияланувчи қаттиқ жисмга оид тенгламаларини, гидродинамика тенгламаларини ва қобиклар назарияси тенгламаларини сонли интеграллаш методикаси таклиф қилинган. Қобиклар динамикаси масалаларини ечиш учун вақт бўйича мумкин бўлган максимал қадамни танлашнинг сонли экспериментлари зарурлиги исботланган. Ишлаб чиқилган алгоритмлар асосида гидроэластик-қайишқоқликнинг икки ўлчовли масалалари ечишга имкон берувчи замонавий ҳисоблаш тизимлари учун ФОРТРАН ва ПАСКАЛЬ алгоритмик тилларида амалий дастурлар пакети яратилган.

Иккинчи бандда сферик панелнинг импульсли деформацияланиши ҳақидаги масала ечилган: сферик панелнинг ички босим таъсирида деформацияланиши масаласи ва сферик панелнинг импульсли юкланиш таъсирида шакл ўзгариши масаласи.

Учинчи бандда ички радиал импульсли юкланиш билан юкланган чексиз узунликдаги цилиндрик қобикнинг эластик-қайишқоқ деформацияланиши ҳақидаги масала ечилган.

Тўртинчи бандда бир биридан эластиклик хоссалари билан фарқ қилувчи икки қатламли цилиндрнинг КДХни тадқиқ қилишга ва ундаги тўлқин динамикасини ўрганишга бағишланган. Ҳар хил услублар ва ҳар хил юкланишларда олинган натижалар деярли бир биридан фарқ қилмайди. Юкланиш қўйилган юзанинг камайиши (оширилиши) қурилманинг энг кўп юкланган қисмига кучли таъсир қилмайди.

Бешинчи бандда сонли алгоритмнинг аниқлиги ва газогидродинамик ҳисоб соҳасида тўлқин жараёнларини ҳисобга олиш сув ости манбасидан гидрозарбали тўлқинларнинг пайдо бўлиши ва тарқалиши, уларнинг эркин ва деформацияланмайдиган сиртлардан қайтиши масалаларини ечиш, портлаш шаклининг сув ости тўлқинига таъсирини ўрганиш билан тасдиқланган.

Олтинчи бандда гидрозарбали юкланишнинг қаттиқ деворни ёпиб турган резина деформацияланиши жараёнига ва гидроэластик тизимда босим тўлқинининг тарқалишига таъсири ўрганилган.

Еттинчи бандда чўкинди қатламда ночизикли сирт тўлқинлари тарқалишини ўрганишнинг ҳисоб модели бир ўлчовли кўринишда келтирилган.

Диссертация ишининг **«Ички ва сув ости портлашлари остида пластинка ва плиталарнинг суюқлик билан ўзаро ностационар таъсирлашиши»** деб номланган тўртинчи бобида сонли эксперимент йўли билан ярим чексиз суюқлик ҳажмида ва плита ичида кенгаювчи газ пуфакчаси босими таъсирида эластик-қайишқоқ пластинка, ётиқ сферик қобик ва плитанинг динамик деформацияланиш жараёни ўрганилган. Тўсиқ сиртидан босим тўлқини манбасининг узоқлашиши ва унинг тўсиққа чуқурлашиши натижасида пластинка, сферик қобик ва плитанинг емирилиш динамикаси ўзгариши таҳлил қилинган. Сув ости портлашининг пластинка, ётиқ сферик қобик ва плита деформацияланиши ва емирилиши характериға таъсири ҳамда тўсиқнинг оддий, кавитацияланувчи, пуфакчали ёки метастабил суюқликдаги босим тўлқинининг тўсиққа таъсири, хусусан, М.А.Лаврентьев раҳбарлигида

ўтказилган эксперимент сонли моделлаштирилган бўлиб, унда гидропортлашдаги юкланиш таъсирига метал пластинканинг қаршилиги ўрганилган.

Биринчи бандда шу бобда ечилган асосий масалаларнинг умумий қўйилиши келтирилган. М.А.Лаврентьев экспериментининг маъноси ва эксперимент натижасида пластинканинг ғайритабiiй ҳолати тўла тавсифланган. Пластинканинг бундай ҳолатини сонли тадқиқ қилиш мақсадида масаланинг сонли модели амалга оширилган, бунда у бир нечта қисм масалаларга бўлинган. Гидропортлаш юкланишида пластинканинг ғайритабiiй ҳолатини ўрганиш билан боғлиқ умумий муаммони ечишнинг кетма-кетлиги тавсифланган.

Иккинчи бандда плитага портлаш чуқурлашишининг суюқликда зарбали тўлқинлар параметрлари ва тўсиқнинг динамик мустаҳкамлигига таъсири ўрганилган. Метал плита билан ёпилган ярим чексиз ҳажмдаги суюқлик берилган бўлиб, унда қўққисдан кенгаювчан газ ҳажми жойлашган. Портлаш манбасининг плитага чуқурлашиши натижасида суюқликда пайдо бўладиган зарбали тўлқин параметрлари ўрганилган. Сонли ҳисобларда плита ва сувдан цилиндрик шаклдаги соҳа ажратиб олинганки, унинг чегараси тадқиқот жараёнининг параметрларига чекли вақт оралиғида таъсир қилмайди. Дастлаб газ соҳаси цилиндрик шаклда бўлиб, унинг симметрия ўқи ажратиб олинган плита ва сув ҳажмининг симметрия ўқи билан уста-уст тушади.

Ҳисоблашлар алюмин (АМГ-6) (эластиклик модули $E=71500$ МПа, чизикли пухталаниш модули $E_1=1500$ МПа, эластиклик чегараси $\sigma_T=275$ МПа, материалнинг зичлиги $\rho=2800$ кг/м³, Пуассон коэффициенти $\nu=0,3$) ва пўлат ($E=200000$ МПа, $E_1=1800$ МПа, $\sigma_T = 400$ МПа, $\rho = 7500$ кг/м³, $\nu=0,25$)дан тайёрланган қалинлиги 1 м плита учун бажарилган. Пентолит зарядининг қалинлиги ва диаметри 0,2 м. Ҳисоблашлар плитанинг қалинлигига нисбатан портлаш плитага чуқурлашишининг бешта вариантыда бажарилди: $d = 2/8; 3/8; 4/8; 5/8; 6/8$. Плитанинг емирилишлари унинг эркин сирти ва суюқлик билан туташ сирти яқинида содир бўлиши кузатилган.

Олинган натижалардан хулосалар: тўсиқ материалидаги емирилиш соҳаси плитанинг четки сиртларига яқин ички нуқталарида пайдо бўлади ва кейин симметрия ўқидан тарқалади; портлашнинг чуқурлашиши ва тўсиқ материали зичлигининг ошиши суюқликда тарқалаётган босим тўлқини амплитудасининг ошишига олиб келади; суюқликда симметрия ўқи бўйлаб тарқалаётган босим тўлқинини $P = P_0 e^{\beta(ct+z)} (1 - e^{\alpha(ct+z)})$ кўринишда ифодалаш мумкин, бунда P_0 , α , β - тўлқинда босимнинг амплитудаси, унинг ошиш ва кейинчалик пасайиш тезлиги; $\alpha = -1/L_1$; $\beta = -1/(L - L_1)$; L - тўлқин узунлиги; L_1 - босимнинг энг катта қийматигача бўлган масофа; c - суюқликдаги босим тўлқини тезлиги; t - вақт; z - координата; барча вариантларда плита яқинида босим тушиши тик, кейинчалик эса сферик тўлқинлардаги каби экспоненциал камайиб боради.

Учинчи бандда суюқликдаги портлаш билан юкланган қалинлиги пиллапояли ўзгарувчан пластинка устида сонли экспериментлар ўтказилди. Бунда пластинканинг қалинроқ қисми резервуар деворини тавсифлайди.

Экспериментларда резервуар девори деформацияланган, шунинг учун кейинги тадқиқотларда пластинка четлари қалинлиги билан берилди.

Суюқликни ҳисоблаш унинг ҳолатини ифодаловчи қуйидаги учта моделлардан бири билан бажарилди: идеал-эластик (емирилмайдиган), бунда унинг ҳолати Тэта тенгламаси билан тавсифланди; емирилувчан, бунда сийраклашиш соҳасида суюқлик икки фазали муҳитга айланиши мумкин деб фараз қилинди ва Н.В.Кузнецовнинг кенг қамровли термик ҳолат тенгламасидан фойдаланилди; пуфакчали, бунда унинг учун иккинчи бобда тавсия этилган ҳолат тенгламаси қабул қилинди. Ҳисоблашлар газ ҳажмидаги бошланғич босим 5; 10; 20 МПа ва зичлиги 1650 кг/м³; ўзгарувчан қалинликли пластина (0,001 м; 0,0007 м) радиуси 0,055 м бўлган ҳоллар учун бажарилди.

Сонли экспериментларнинг асосий қисми кавитацияланувчи суюқлик модели бўйича бажарилди, чунки у пластинканинг тўнкарилишига олиб келувчи босимнинг тез тушишини беради. Асосан пластинканинг марказий қисми деформацияланади, пластинка тескарига тўнкарилишининг тезлиги максимал мусбат эгилишларига эришиш тезлигига нисбатан қарийб икки марта катта. Бу ҳолда, пластинканинг тўнкарилиши, биринчи навбатда, балки пластинка қалин қисмининг эластик энергияси ҳисобига содир бўлади. Худди шундай, ташқи юкланиш бўлмаган ҳолда пуфакчали кавитацияланиш ҳисобга олинган суюқлик билан таъсирлашувчи юпқа пластинканинг деформацияланиши тадқиқ қилинган.

Импульсли ва гидродинамик юкланишларда тўсиқнинг шакл ўзгаришларини тадқиқ қилиш қуйидаги хулосаларга олиб келди: пластинка юкланиш таъсири тарафига қарама-қарши йўналган эгилишларга эга бўлиши мумкин; пластинкадаги моментли зўриқишлар тескари тўнкарилиш пайдо бўлишини йўқ қила олмайди; тўнкарилиш юкланиш ва пластинка геометрияси параметрлари ўзгаришининг етарлича кенг чегараларида кузатилиши мумкин; қайновчи ва идеал-эластик суюқлик моделлари сув ости портлаши натижасида кузатиладиган пластинка тўнкарилишини ҳисоблашга имкон бермайди; юкланиш характерининг озгина ўзгариши натижасида газогидро-эластик-қайишқоқ тизим силлиқ ва қалинлиги пиллапояли ўзгарувчан пластинкасимон элементининг эластик-қайишқоқ деформацияланиши жараёнида динамик устуворлик йўқотилиш ҳоли кузатилиши мумкин.

Шундай қилиб, М.А.Лаврентьев эксперименти биринчи марта сонли моделлаштирилди ва портлаш қуввати ва қурилма геометриясининг ҳар хил қийматларида ҳамда тўсиқ ва суюқликнинг ҳар хил моделларида пластинканинг тескарига (юкланиш таъсирига тескари) шакл ўзгариши исботланди.

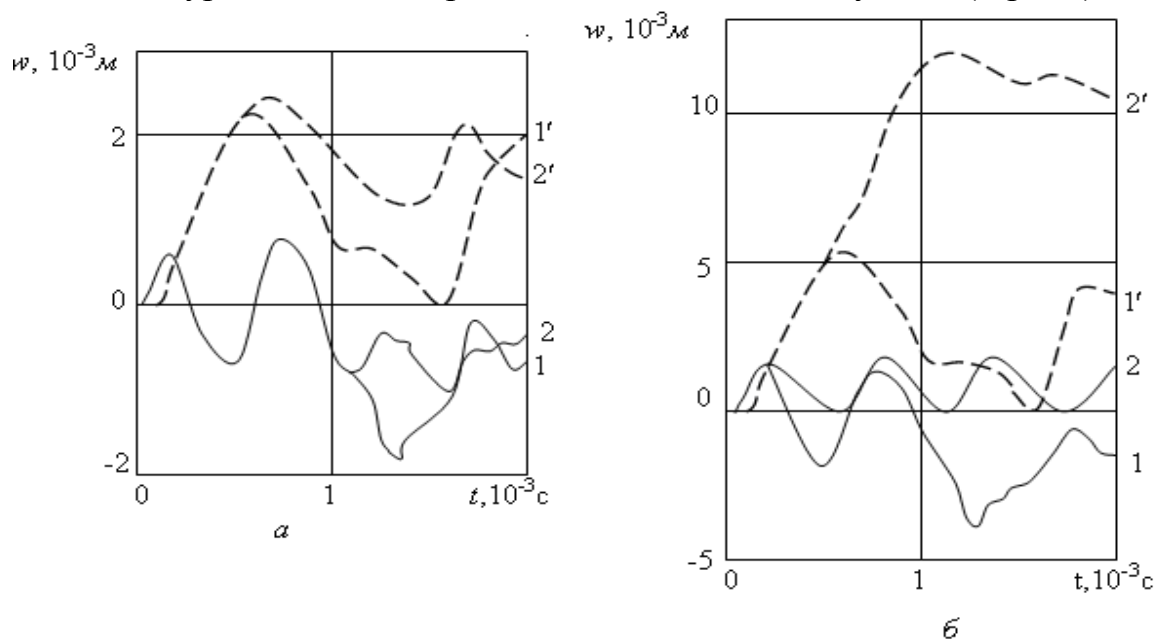
Диссертация ишининг **«Цилиндрик қобикларнинг пуфакчали, кавитацияланувчи, юқори ҳароратли ва криоген суюқлик билан ўзаро ностационар таъсирлашиши»** деб номланган бешинчи бобида қурилма ташқи сиртининг бир қисми бўйлаб юкланиш қўйилган ҳолда суюқлик орқали ўзаро таъсирлашишаётган қўш ўқли металл цилиндрлик қобикларнинг импульсли деформацияланиши ўрганилган. Юкланиш юзасининг камайиши (ошиши), гидродинамик тенглама ночизиклилиги ва суюқлик емирили-

шининг қаралаётган гидроэластик тизим деформацияланганлик ҳолатига таъсири таҳлил қилинган. Пуфакчали суюқлик динамикаси ва ностационар кавитациянинг гидроэластик тизим элементлари эластик ва эластик қайиш-қоқ деформацияланишига таъсири ўрганилган. Суюқлик динамикасини тавсифлаш учун 2.3-банддаги ҳар хил ҳолат тенгламалари қўлланилган.

Биринчи бандда бу чегаравий масалаларнинг қўйилиши тавсифланган.

Иккинчи бандда суюқлик билан ажратилган иккита қўш ўқли металл цилиндрик қобикларнинг ташқи сиртининг бир қисми бўйлаб қўйилган импульсли юкланиш таъсирига қаршилиги ўрганилган. Сонли экспериментлар натижаларидан аниқландики: суюқлик билан ажратилган қўш ўқли цилиндрик қобиклар системасида ташқи қобик сирти бўйлаб юкланиш юзаси ўлчами ташқи қобикнинг деформацияланишига сезиларли таъсир қилади, ички қобикнинг эгилишлари ташқи импульсли юкланиш юзачасидан боғлиқ эмас, аммо юкланиш юзачасининг ошиши билан у ҳам ошиб боради; юкланиш амплитудасининг ошиши билан гидродинамика тенгламалари нозикчилигининг қобик эгилишларига таъсири ўсиб боради, бунда унинг таъсири ташқи қобикқа нисбатан ичкисига сезиларли; кавитация қабул қилинган юкланиш ва қобиклар параметрларида ташқи қобик эгилишларининг камайишига ва ички қобик эгилишларининг ошишига олиб келади, яъни қобиклар орасида суюқлик бўлганда ташқи импульсли юкланиш ташқи қобикқа нисбатан ичкиси учун хавфлироқ.

Сонли экспериментлар натижалари тўсиққа келиб тушаётган тўлқин интенсивлигини камайтириш билан гидроэластик тизим элементлари ҳолатини бошқариш мумкинлигини кўрсатади. Муҳит орқали узатилаётган ички импульсли юкланиш ташқи қобикнинг интенсив юпқалашишига, кейинчалик қурилманинг емирилишига олиб келиши мумкин (1-расм).



1-расм. Суюқликдаги пуфакчали кавитациянинг $q_0=20$ МПа (а) ва $q_0=50$ МПа (б) да қобик пластик деформацияланишига таъсири: суюқликнинг кавитацияланувчи ва пуфакчали моделлари бўйича ҳисобланган 1,2 – эгри чизиқлар ички қобикнинг ва 1', 2' – эгри чизиқлар ташқи қобикнинг эгилишлари.

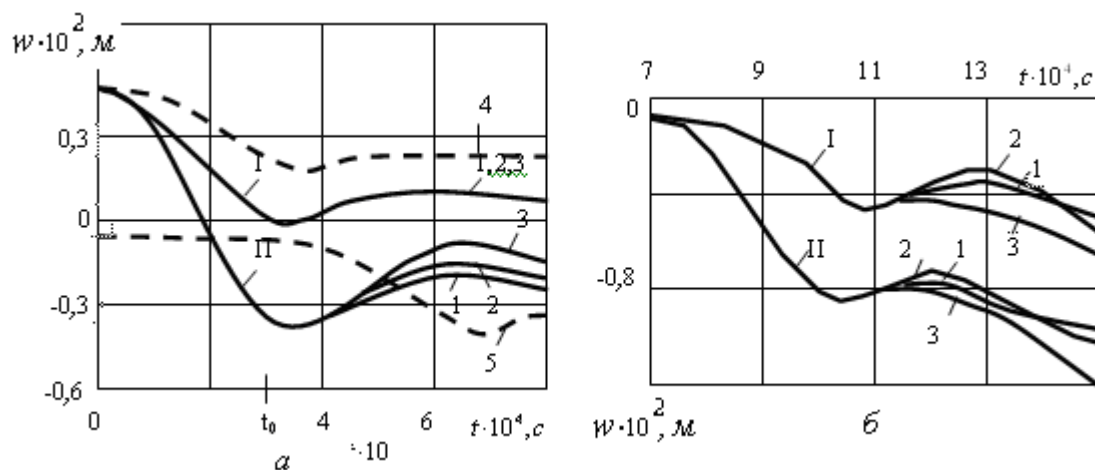
Ушбу бобнинг учинчидан то бешинчигача бандлари идеал-эластик, кавитацияланувчи, пуфакчали, метастабиль ва криоген (азот, кислород, гелий) суюқлик моделлари бўйича олинган натижаларни таққослаш, қайнаш ҳолатига яқин юқори ҳароратли суюқлик ҳоли учун гидроэластик-қайишқоқлик масалаларини ечиш, суюқликнинг қайнаши ва улардаги газ ҳажмлари борлигининг цилиндрик қобиклар деформацияланиши ва емирилишига таъсирини таҳлил қилишга бағишланган. Ҳар хил суюқликлар (ёки ҳар хил ҳолатдаги суюқликлар) билан ажратилган иккита қўш ўқли цилиндрик қобикларнинг ҳолатини ташқи импульсли юкланиш таъсирида ўрганиш бўйича масалалар қаралган. Қобикларнинг ҳаракати моментли назария тенгламалари билан тавсифланган. Суюқлик ҳолати 2.3-бандда келтирилган ва температура ва босимнинг кенг диапазонида ўринли бўлган гидродинамиканинг ҳолат тенгламалари билан тавсифланган.

Учинчи бандда нормал ҳароратли, иситилган ва қайнаш ҳолатидаги сув билан ажратилган иккита қўш ўқли цилиндрик қобикларнинг деформацияланиши ҳақидаги масала ечилган. Импульсли юкланиш 3-бобнинг 4-бандидаги каби берилди. Суюқликдаги статик босим 1 МПа деб олинди. Тэга тенгламасига кўра эластик суюқлик модели (1-алгоритм), кавитацияланувчи суюқлик модели (2-алгоритм), Кузнецов тенгламаси (3-алгоритм), Тэга ва Химпан тенгламалари бўйича мос равишда суюқликнинг туташ ва икки фазали ҳолатларида (4-алгоритм) ҳисобланган. Ҳар хил моделлар бўйича ҳисобланган ташқи қобик эгилишлари бир биридан фарқ қилмайди. Ички қобик ҳоли учун тасвир бошқача. 2-расмда ташқи қобикнинг қалинлиги 0,01 м ва ичкисиники 0,02 м бўлган ва $T_0 = 555,22^{\circ}\text{K}$ да қайнаш ҳолатига яқин бўлган сув учун қобиклар пешана нуқталарининг эгилиш эгри чизиқлари тасвирланган. Сувнинг суюқ ва пар фазалари учун мос келувчи термодинамик параметрлар маълум. Эгри чизиқлар $P_0=10$ МПа ва $q_0 = 30; 60$ МПа да ҳисобланган. Сувнинг бир фазали ҳолатидан икки фазали ҳолатига ўтиши тўрт хил алгоритм асосида ҳисобланди.

Суюқликда қайнаш пайдо бўлишини ҳисобга олган ҳолда босим ўзгаришлари қонуниятларини таҳлил қилиш қизиқарлироқ. Қайнаш жараёни суюқликда босимнинг тушиб кетишини чеклайди.

Навбатда қурилма сиртининг бир қисмига ташқи импульсли юкланиш қўйилганда қайнаш ҳолатига яқин юқори ҳароратли суюқлик билан ажратилган иккита қўш ўқли металл цилиндрик қобикларнинг ҳолати таҳлил қилинган. Юкланиш юзачаси камайиш (кўпайиши)нинг қаралаётган гидроэластик тизим қобиксимон элементлари деформацияланган ҳолатига таъсири таҳлил қилинган.

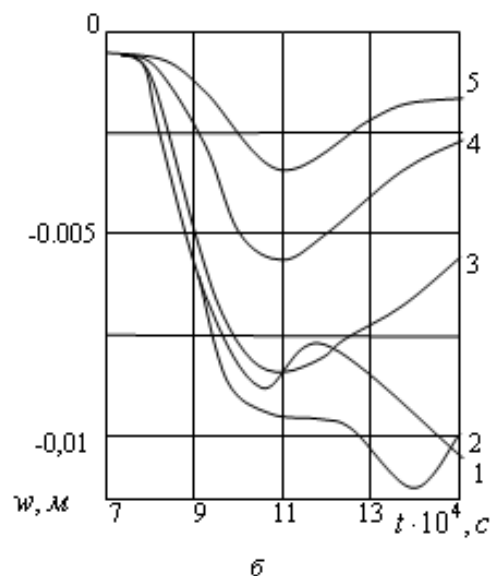
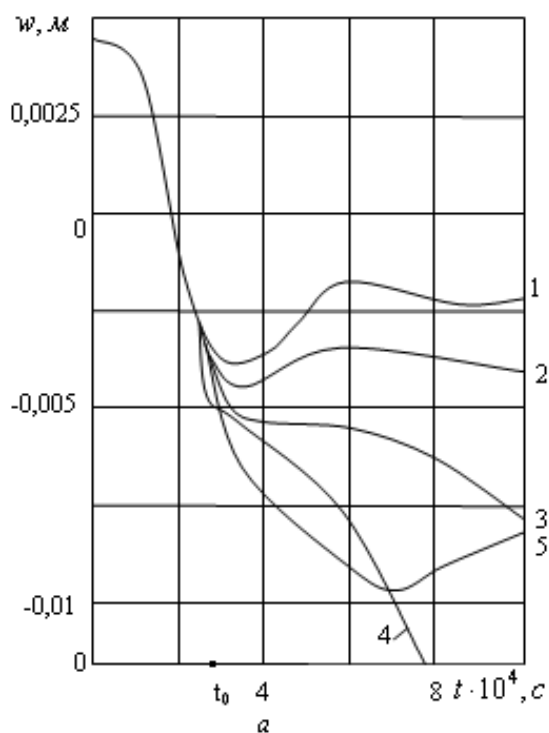
Ҳисоблашлар радиуслари 0,5 м ва 1 м бўлган пўлат қобикларнинг 0,02 ва 0,01 м ли мос қалинликларида бажарилган. 3-расмда қурилманинг ташқи сиртига 30 МПа амплитудали юкланиш қўйилгандаги қайнаш ҳолатига яқин бўлган ҳолда иситилган суюқлик учун қобиклар (a - ташқи; b - ички) пешана нуқталарининг радиал эгилишлари эгри чизиқлари келтирилган. Расмда тасвирланган нуқта юкланиш таъсирининг тугаш моментига мос келади.



2-расм. Сувнинг $T=555,22K$ да бир фазаликдан икки фазаликка ўтишининг ҳар хил алгоритмлари асосида ҳисобланган қобиқ эгилишларини таққослаш: I - $q_0=30$ МПа; II - $q_0=60$ МПа; 1 - алгоритм 1 - Кузнецов тенгламаси; 2 - алгоритм 2 - Тэта (қайнаш йўқ соҳада) ва Химпан (қайнаш соҳасида) тенгламаси; 3 - алгоритм 3 - Тэта (қайнаш йўқ соҳада) ва қайновчи суюқлик (қайнаш соҳасида) тенгламаси; 4, 5 - алгоритм 4 - Тэта (қайнаш йўқ соҳада) ва Кузнецов (қайнаш соҳасида) тенгламаси.

Натижада қурилманинг деформацияланиш вақти юкланиш вақтидан анча юқори эканлиги кўринади. Резервуар деворларининг бошланғич деформацияланган ҳолати ички суюқликнинг статик босимини ҳисобга олган ҳолда аниқланган. 1-5 рақамлар юкланишнинг 180° , 120° , 60° , 30° , 15° бурчакларига мос келади. Кўринадики, юкланиш юзачасининг миқдори ташқи ва ички қобиқларнинг эгилишларига бир хил таъсир қилмас экан. Ташқи қобиқнинг эгилишлари юкланиш юзачасининг камайиши билан дастлаб ошиб боради, ўзининг максимал қийматига эришади (4 эгри чизик) ва кейин камаяди (5 эгри чизик). Бу юкланиш юзачаси катта бўлганда кучланганлик ҳолати моментсиз ҳолатган яқинлиги, қўйилган импульснинг кичик юзачаси қурилманинг сезиларли деформацияланиши учун етарли эмаслиги билан боғлиқ. Максимал кўчишлар импульс кучи каттароқ, кучланганлик ҳолати моментсизлик ҳолатидан узоқроқ бўлган жойларда ўринли (3 ва 4 эгри чизиклар). Ички қобиқ учун таҳлил қилинаётган боғланиш соддароқ, яъни юкланиш юзачасининг камайиши билан максимал эгилиш ҳам камаяди.

Ушбу банднинг давомида босим тўлқини манбаига эга суюқлик билан ажратилган иккита қўш ўқли цилиндрик қобиқларнинг ностационар деформацияланишини тадқиқ қилишга бағишланган. Сийраклашиш тўлқинларида суюқлик қайнашининг шу муҳитни ўраб турган цилиндрик қобиқлар ҳолатига таъсири қаралган. Қобиқлар ҳароратининг улар ўзлари деформацияланишига ҳисобга олинмади. Ички қобиқнинг радиуси ва қалинлиги мос равишда 0,5 ва 0,01 м, ташқисиники 1 ва 0,01 м. Фараз қилайлик, $t=0$ вақт momentiда қўзғалишлар манбаи бўлган баъзи ҳажмчалар эътиборга олинмаганда суюқликнинг барча нуқталарида ҳарорат $500^\circ K$, статик босими эса $P_0=5$ МПа. Кўрсатилган ҳажмларда бошланғич температура ва босим мос равишда $600^\circ K$ ва 20 МПа. Қўзғалишлар манбаи қобиқлар орасида ўрталикда жойлашган.



3-расм. Юкланиш юзачаси ўзгаришининг таъсири: 1 – $\theta = 180^\circ$; 2 – $\theta = 120^\circ$; 3 – $\theta = 60^\circ$; 4 – $\theta = 30^\circ$; 5 – $\theta = 15^\circ$.

Суяқлик бўйлаб қўзғалишлар тарқалишини сонли тадқиқ қилиш шуни кўрсатадики, битта манба бўлганда қайнаш ҳодисаси деворлар деформацияланиши натижасида қобиклар пешана нуқталари атрофида пайдо бўлади. Қайнаш соҳаси қобиклар бўйлаб деформациялар тўлқини билан биргаликда тарқалади. Иккита манба бўлганда қайнаш соҳаси, юқорида айтилганлардан ташқари, манбалар орасидаги суяқлик ҳажмида ҳам пайдо бўлади. Бу манбалардан келаётган гидрозарбалар тўқнашиши, кейин эса тўқнашиш жойида сийраклашиш соҳасининг пайдо бўлиши натижасида ҳосил бўлади.

Тўртинчи бандда қайновчи суяқлик орқали таъсирлашишаётган қўш ўқли иккита пўлат цилиндрлик қобиклардан тузилган қурилманинг динамик ҳолати ҳақидаги масала ечилган. Қурилма ички сирти бўйлаб симметрик радиал импульсли босим қўйилган. Қобикларнинг геометрик характеристикалари: $R_1 = 0,5$ м; $R_2 = 0,75$ м; $h_1 = h_2 = 0,005$ м. Юкланиш амплитудаси ўзгаради. Юкланиш интенсивлиги вақт бўйича асоси $(R_2 - R_1)/c$ бўлган тенг ёнли учбурчак қонуни бўйича ўзгаради, бунда c – сувда товуш тарқалиш тезлиги. Ҳисоблашлар характеристикалари $P_0 = 0,1$ МПа; $\rho_0 = 982$ кг/м³; $T_0 = 293^\circ\text{K}$ бўлган метастабиль суяқлик билан ўзаро таъсирлашишаётган эластик ва эластик-қайишқоқ қобиклар учун бажарилди. Атроф муҳитнинг ҳарорати қобик материалининг қайишқоқлик характеристикалари ($\sigma_t = 200$; 300 ва 400 МПа) ни ўзгартиради, деб фарз қилинди. Юкланиш амплитудаси 30 МПа. Натижалар шуни кўрсатадики, қайновчи суяқлик (Кузнецов тенгламаси) модели бўйича олинган натижалар идеал-эластик суяқлик модели бўйича олинган натижаларга яқин. Бунинормал ҳароратда Кузнецов тенгламаси Тэта тенгламасини умумлаштиради деб изоҳлаш мумкин. Материал оқувчанлик чегарасининг ошиб бориши билан у ўзини эластик ҳолатдагидек ҳис қилиб боради.

Суюқлик учун куйидаги бошланғич характеристикалар билан гидро-эластик-қайишқоқ тизим ҳисоби бажарилди: $P_0 = 10$ МПа; $\rho_0 = 750,5$ кг/м³; $T_0 = 555,22^\circ\text{K}$. Ҳисоблашлар кўрсатдики, атроф муҳит ҳароратининг ошиши ички қобикқа нисбатан ташқисига хавфлироқ. Метастабиль суюқликда қўзғалишлар тарқалишининг сонли тадқиқи шуни кўрсатдики, қайнаш ходисаси резервуар девори деформацияланиши натижасида қобиклар пешана нукталари атрофида содир бўлади. Қайнаш соҳалари қобиклар бўйлаб деформациялар тўлқини билан биргаликда ва суюқлик чуқурлиги бўйлаб тарқалади. Ҳар хил материаллардан тайёрланган қобикларнинг қайишқоқ юпқаланиши динамикасининг сонли ҳисоби бажарилди. Ҳисоблашлар ички ва ташқи қобикларнинг куйидаги характеристикаларида бажарилди: $\sigma_t = 400$ МПа, $\sigma_p = 600$ МПа, $E_1 = 500$ МПа - пўлат; $\sigma_t = 100$ МПа, $\sigma_p = 350$ МПа; $E_1 = 1500$ МПа - 16АТ; $\sigma_t = 200$ МПа, $\sigma_p = 400$ МПа; $E_1 = 1000$ МПа - БрКМЦ, ҳамда температураси ҳисобга олинган пўлат ($\sigma_t = 200$ МПа) учун $q_0 = 50$ МПа.

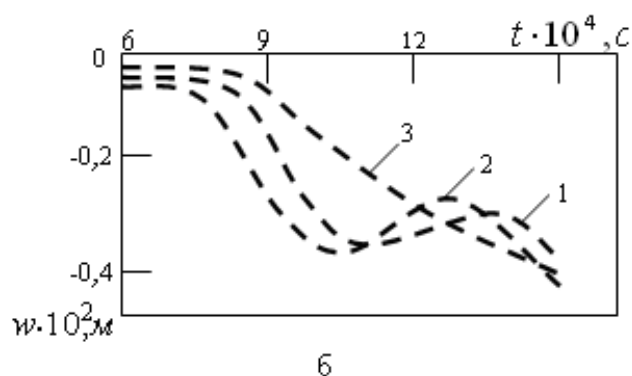
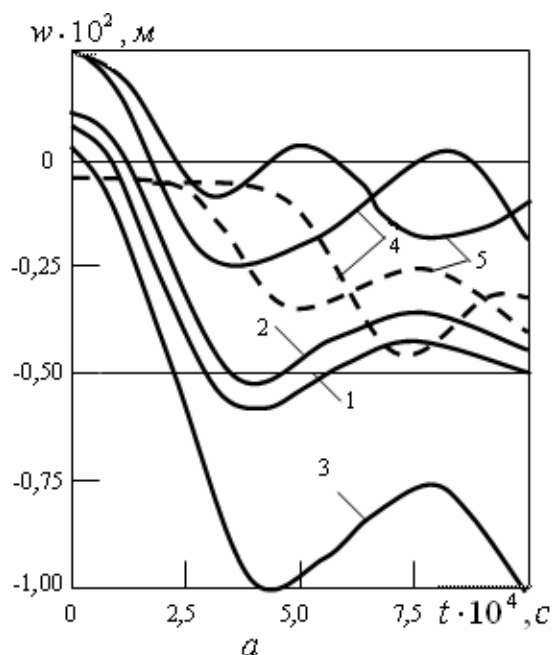
Қобиклар деворларининг қайишқоқ юпқаланиши пешана нукталаридан бошланади, кейин ундан тарқалиб бошлайди. Юкланиш интенсивлигини камайтириш қобик эластик-қайишқоқ деформацияланганлик ҳолатининг эластикликка яқинлашиб боришига олиб келади. Бу натижалардан келиб чиқадики, атроф муҳитнинг температурасини ошириш ва қурилма ўзининг температурасини ҳисобга олиш, ҳамда қобиклар материалининг мустаҳкамлик характеристикаларини камайтириш резервуар деворининг қайишқоқ юпқалашиши интенсивлиги кучайишига ва натижада қурилманинг емирилишига олиб келади.

Бобнинг охириги бешинчи бандида криоген суюқликлар (суюлтирилган гелий, азот, кислород)нинг сийраклашиш соҳаларида қайнашининг шу муҳитни ўраб турган цилиндрик қобиклар ҳолатига таъсири тадқиқ қилинган. Қобиклар ўзлари температурасининг улар деформацияларига таъсири эътиборга олинмаган. Ички қобикнинг радиуси ва қалинлигини мос равишда 0,75 м ва 0,002 м, ташқисиникини эса мос равишда 1 м ва 0,01 м. деб фараз қилдик. Ҳар бир суюқликнинг бошланғич босими P_H тўйиниш босимининг 1/10 қисмига, бошланғич температураси эса $4T_{кр}/5$ га тенг. Ҳар бир атроф муҳит учун P_H нинг қиймати тақвим маълумотларига асосланиб, бошланғич температуранинг қийматига мос қилиб аниқланди.

4-расмда қобиклар пешана нукталарининг эгилиш эгри чизиқлари 30 МПа амплитудали юкланиш учун тасвирланган. Кўринадикки, ташқи қобикнинг деформацияланиш характери тўлдирилган суюқликдан кучли боғлиқ. Умуман олганда, суюқлик зичлиги қанча кам бўлса эгилишлар ҳам шунча катта. Шу билан бирга ички қобикнинг эгилишлари ташқисиникига қараганда кам, улар суюқликнинг хоссасидан боғлиқ. Бу ҳол ташқи қобикнинг ҳар хил суюқликлардаги тўлқинни жамлаш хусусиятидан боғлиқ.

Азот, кислород, гелий, қайновчи сув ва нормал шароитдаги сув учун ички қобик пешана нуктаси яқинида ҳисобланган босим эгри чизиқлари таққослаган. Суюқликларнинг кескин фарқ қилишига қарамасдан уларда тарқалаётган тўлқинлар амплитудаси ва шакли кескин фарқ қилмайди. Булар-

дан фарқли равишда, гелий учун тўлқин амплитудаси бошқа суюқликлардагиникига қараганда қарийб тўрт марта кичик. Аммо бу тўлқиннинг узунлиги кислород ва азотдаги ҳолга нисбатан қарийб икки марта ортиқ.



4-расм. Кримоген суюқликлар қайнашининг ташқи (туташ чизиқлар) ва ички (штрихли чизиқлар) қобиқ пешана нуқтасининг эгилишларига таъсири: 1- азот; 2- кислород; 3- гелий (б-расмда $t = 0.0026 \dots 0.0035$ с); 4- сув учун $T=517$ К ($P_H=3,59$ МПа); 5- сув учун $T=0$ (кавитация ҳисобга олинмаган).

Бир фазаги ҳолатдан икки фазаги ҳолатга ўтиши жуда яқин метастабил ёки криоген суюқликларни чеклаб турувчи қобиқларнинг катта тезликда деформацияланишида суюқликда қайнаш пайдо бўлиши мумкин. Бундан келиб чиқадики, бу бобда асосий эътибор газогидроэластик-қайишқоқ тизимларда импульс амплитудасининг юқори ҳароратли суюқлик қайнаши жараёнига ва суюлтирилган газлар (азот, кислород, гелий)нинг туташ муҳитлар ўзаро но-чизиқли таъсирлашишига ҳамда тўлқин жараёнларига таъсирига қаратилган.

Сонли ҳисоб натижалари кўрсатдики, суюқликнинг бир фазаги ҳолатидан икки фазаги ҳолатига ўтишини ҳисобга олувчи самарали алгоритм бу кенг диапазонли Кузнецов тенгламаси ва суюқликда кавитацион жараённи ҳисобга олиш экан, чунки уларнинг сонли қўлланилиши анча содда ва ШЭХМларда катта тезликда сонли ҳисоблашларни бажаришга имкон беради. Бундан ташқари, Кузнецов тенгламаси Тэта тенгламасини босимнинг 10000 МПа гача қийматларида умумлаштиради; Тэта тенгламаси бўйича ҳисобланган товуш тезлиги иситилган суюқликдагига нисбатан юқори, шунинг учун нормал ҳароратда ҳисобланган қобиқ ички эгилишлари иситилган суюқликдагига нисбатан тез ўсиб боради.

Юкланиш юзачаси камайишида қобиқларнинг динамик ҳолатлари умуман олганда суюқликнинг қайнаши ҳисобга олинмаган ҳолга мос келади, аммо қобиқлар эгилишларининг амплитудаси фарқ қилади; резервуарда қайновчи оддий ва криоген суюқликларнинг борлиги суюқликдаги босим тўлқини амплитудасининг сезиларли манфий қийматга тушишига йўл қўймайди; гидроэластик тизим ичида иссиқлик портлашининг борлиги девор деформацияланиши натижасида шу яқин нуқталар атрофида суюқлик қайнашига олиб келади ва бу соҳа қобиқлар деформацияланиши тўлқини ва суюқ-

лик чуқурлиги бўйлаб тарқалади; иккита манбанинг мавжудлиги қайнаш соҳалари кўрсатилгандан ташқари манбалардан келаётган гидрозарбаларнинг тўқнашиши натижасида манбалар орасидаги ҳажмда ҳам пайдо бўлади.

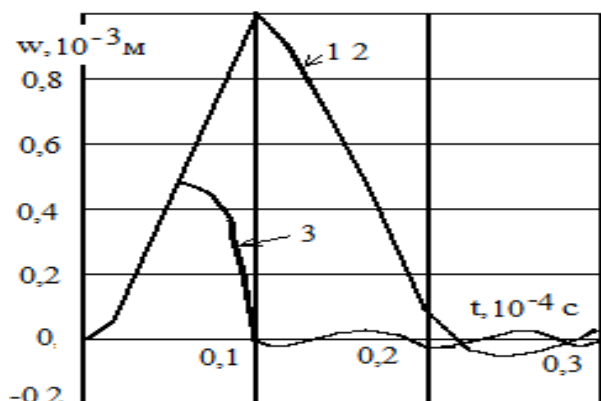
Ҳамма айтилганларни умумлаштириб хулоса қилиш мумкинки, бу боб доирасида босим ва ҳароратга нисбатан экстремал ҳолатдаги суюқликларнинг қобиқлар билан ўзаро таъсирлашиши мураккаб масалаларини ечиш имконини берувчи сонли алгоритмлар ва сонли методика ишлаб чиқилган. Сув ва криоген суюқликлар мисолида сийраклашиш соҳаларида суюқликнинг қайнаши жараёнининг қобиқлар эластик-қайишқоқ деформацияланиши ва емирилишига ҳамда гидроэластик-қайишқоқ тизимларда тўлқин жараёнларига таъсири кўрсатилган.

Диссертация ишининг **«Суюқлик билан ўзаро таъсирлашувчи чекли узунликдаги цилиндрик қобиқнинг эластик-қайишқоқ деформациялари»** деб номланган олтинчи бобида чекли узунликдаги цилиндрик қобиқнинг импульсли ва гидродинамик юкланишлар таъсири остидаги эластик-қайишқоқ деформацияланиши жараёни сонли тадқиқ қилинган. Қобиқлар ҳисоби Кирхгоф-Ляв ва Тимошенко назариялари асосидаги эластик ва эластик-қайишқоқ моделлари учун ўтказилган. Қўйилган масалани сонли ечиш услубларининг таққосланиш баҳоси берилган. Юкланиш таъсири вақти, интенсивлиги ва амплитудаси ҳамда жисм геометрик ва механик характеристикаларининг гидроэластик-қайишқоқ тизимнинг ностационар ҳолатига таъсири таҳлил қилинган.

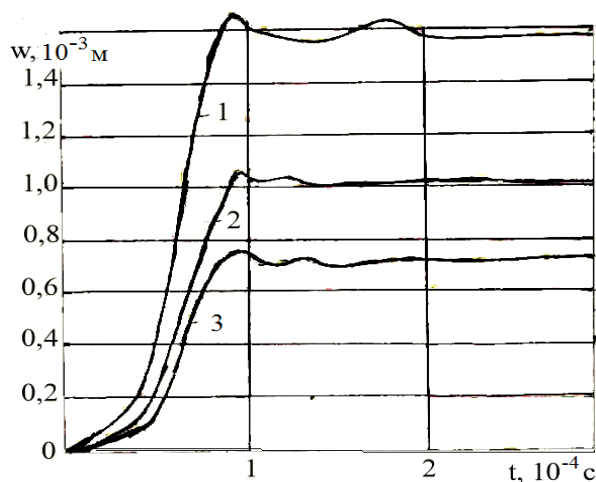
Биринчи бандда ностационар гидроэластик-қайишқоқ иккита масаласининг қўйилиши берилган: чекли узунликдаги ётиқ цилиндрик қобиқнинг ички сирти бўйлаб қўйилган ички импульсли юкланиш таъсири остидаги ночизиқли эластик-қайишқоқ деформацияланиши жараёни; импульсли ва гидродинамик юкланган чекли узунликдаги цилиндрик қобиқнинг деформациялануши суюқ муҳит билан ностационар ўзаро таъсири.

Иккинчи бандда чекли узунликдаги юпқа цилиндрик қобиқларнинг Кирхгоф-Ляв гипотезаларига асосланган ночизиқли назарияси зарур тенгламалари, кейин эса уларни ечишнинг ошқормас схемаси шаклидаги чекли айирмалари сонли алгоритми келтирилган. Қобиқ чизиқли ва ночизиқли ҳаракат тенгламалари, чегаравий шартлари (зўриқиш ва моментларга нисбатан), геометрик ўлчамлари (қобиқнинг қалинлиги, узунлиги ва радиуси), физик-механик параметрлари (пўлат, Д16АТ, БрКМц) ва юкланиш шакли (тўғри бурчакли учбурчак, синусоидал)нинг қобиқ деформацияланиши характериға таъсири ўрганилган. Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики: қобиқ тебранишининг ночизиқли тенгламасини ошқормас схема билан ҳисоблаш тебраниш амплитудасининг қийматини камайтиради ва частотасининг қийматини оширади (5-расм); қобиқнинг қалинлигини ва узунлигини камайтириш ва унинг радиусини ошириш эластик тебранишлар амплитудасининг ошишига олиб келади; материалнинг пластик хоссаларини эътиборга олиш юкланиш ошганда кўчишнинг чексиз ўсишини кўрсатади; материалнинг пластик хоссаларини эътиборга олиш эгилишни қарийб икки марта оширади (6-расм); тушаётган импульснинг узунлиги ва амплитудасининг ошиши қобиқ марказий нуқтаси

қайишқоқ-эластик эгилишларининг вақт бўйича ўсишига олиб келади; қобик узунлигининг ўзгариши ва материали механик хоссаларининг бироз ўзгариши марказий нукта эгилишига таъсири жуда кам, радиуси ва қалинлигининг ошиши эса эгилишларнинг ошишини кўрсатади.



5-расм. Қобик марказий нуқтасининг эластик эгилишлари чизикли (1-чизик) ва ночизикли (2-чизик) тенгламани ошкор схема ва ночизикли тенгламани ошкормас схема (3-чизик) билан ҳисоблаш натижалари.



6-расм. Қобик материали ўзгариши (1-чизик - Д16АТ, 2-чизик - БрКМц, 3-чизик - пўлат) нинг марказий нуқтаси эластик-қайишқоқ эгилишларига таъсири.

Шундай қилиб, ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, материал пластик хоссаларининг жамланишини ҳисобга олиш қадамини ўзгартириш қолдиқ эгилишларга кам таъсир қилади. Бунда максимал пластик эгилишлар эластик эгилишлардан 30-40% га ортиқ. Пластиклик соҳаси қобик марказий нуқтасида жамланади. Импульсли юкланиш таъсирида қобик бочка шаклида келади. Чизикли ва ночизикли ҳособ натижалари етарлича катта фарқ қилади. Материалнинг пластик хоссаларини эътиборга олиш қурилма деформацияланишининг характериға таъсири сезиларли.

Учинчи бандда чекли узунликдаги юпқа цилиндр қобик учун С.П.Тимошенко геометрик ночизикли асосий муносабатлари, ҳар хил суюқликлар (пуфакчали - 1-модель; кавитацияланувчи - 2; Тэта - 3; Кузнецов - 4) моделлари учун гидродинамика тенгламалари ҳамда ошкормас схема шаклидаги чекли айирмали сонли алгоритм ва уларнинг ечимлари келтирилган. Мисол тариқасида чекли узунликдаги пўлат цилиндр қобикнинг цилиндр ўқиға жойлаштирилган портловчи модда кенгайишидан ҳосил бўлган ички гидродинамик юкланиш таъсиридаги ҳолати, суюқлик бўлмаган ҳолда эса қурилма ички сиртиға қўйилган импульсли юкланиш таъсиридаги ҳолати ўрганилган. Қобикнинг геометрик ўлчамлари: $R = 0,014$ м; $h = 0,001$ м; $L = 0,2$ м. Қобик материалининг характеристикалари: $E = 200000$ МПа; $\nu = 0,25$; $\rho = 0,00785$ кт/м³; $\sigma_t = 400$ МПа; $E_1 = 500$ МПа. Қобикнинг четлари эркин.

Ҳисоблашлар шуни кўрсатадики: пластиклик суюқликда босим тўлқини амплитудасининг ошишиға олиб келади; пуфакчали ва кавитацияланувчи суюқликлар моделлари бир-бириға яқин ва Тэта ва Кузнецов бўйича суюқликлар моделлари бир-бириға яқин натижаларни беради; қобик материали параметрларининг ва геометриясининг ўзгариши

ҳисоблашларнинг устуворлигига таъсири кам; қобик пластик деформацияларининг жамланишини ҳар хил қадамларда ҳисоблаш унинг марказий нуктаси эгилишларига таъсири сезиларли.

Импульсли юкланиш таъсирида қобик бочка шаклини олади. Чизикли ва ночизикли моделлар ҳисоблари натижалари фарқи сезиларли. Материалнинг пластиклик хоссасини эътиборга олиш қурилма деформацияларга сезиларли таъсир қилади. Ҳисоблашлар натижаларига кўра гидродинамик юкланиш гирозластик-қайишқоқ тизимнинг мураккаб кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатини келтириб чиқаради. Юкланиш таъсири ва муҳитнинг ҳолатини ҳисобга олиш қобик мустаҳкамлиги ва чидамлилиги қобилятини баҳолаш учун жуда муҳим ҳисобланади.

ХУЛОСА

«Қурилмалар ночизикли деформацияланувчан элементларининг суюқлик билан ўзаро ностационар таъсири» мавзусидаги докторлик диссертацияси бўйича олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида қуйидаги асосий хулосалар тақдим этилди:

1. Қурилмалар қобиксимон элементларининг суюқ ва газ муҳитлар билан ўзаро ностационар таъсирлашиши назарияси уларнинг ночизикли ва эластик-қайишқоқ деформациялари ва метастабил ва криоген суюқликлар билан ўзаро таъсирлашиши ҳисобга олинган ҳолда ривожлантирилди.

2. Учта муҳит (қаттиқ жисм, суюқлик ва газ) ўзаро таъсирининг самарали математик модели яратилди ва эластик-қайишқоқ деформацияланувчан қурилмалар плита, пластинка ва қобиксимон элементларининг ҳар хил суюқликлар билан ўзаро таъсири механикасининг янги синфдаги масалаларини сонли ечиш методикаси ишлаб чиқилди.

3. Ночизикли деформацияланувчан плита, пластинка ва қобикларнинг кавитацияланувчи ва сийраклашиш тўлқинларида қайновчи, силжувчан чегаравий шартлар ўринли бўлганда зичлашиш тўлқинлари манбаларига эга суюқликлар билан ўзаро ностационар таъсири ҳақидаги икки ўлчовли масалаларини сонли ечиш усули ишлаб чиқилган ва қўлланилган. Ушбу усул суюқликлардаги кавитация, пуфакчали кавитация ва қайнаш жараёнларининг қурилма КДХга таъсирини тадқиқ қилиш, суюқликда гидрозарба тўлқинлари амплитудасини камайтириш имконини беради.

4. Газ ҳажмларини ўз ичига олган, кавитацияланувчи ва қайновчи суюқликлар билан ўзаро таъсирлашаётган изотроп плита, пластинка ва қобикларнинг импульсли ва гидродинамик юкланишларда эластик-қайишқоқ деформацияланиши ва емирилиши масалалари сонли ечиш технологияси ишлаб чиқилди. Олинган натижалар суюқлик билан ўзаро таъсирлашаётган қурилмалар элементларининг динамика деформацияланиши ҳақидаги амалий масалаларни ечишда муҳим аҳамиятга эга ва суюқликдаги катта ҳажмдаги газ плита, пластинка ва қобикларнинг ночизикли деформацияланишига кучли таъсир этилиши хусусан, ночизикли масалада чизикли масалага нисбатан

пластиклик соҳа ошишининг олдини олиш каттароқ эгилишини аниқлаш имконини берди.

5. Ҳар хил суяқликларда фазавий алмашилишлар пайдо бўлишининг пластинка ва қобиклар эластик-қайишқоқ деформацияланишига таъсири жараёнлари тадқиқ этилди. Ушбу тадқиқотлар натижасида қурилма элементларининг мустаҳкамликка динамик ҳисобида суяқликда кавитация ва пуфакчали кавитация ҳамда сийраклашиш тўлқинларида метастабил ва криоген суяқликларнинг қайнаши ҳодисаларини ҳисобга олиш мажбурий шарт эканлиги исботланди.

6. Ер ва сув ости қувурлари мустаҳкамлигининг сонли ҳисоб услуби тўлқин назарияси асосида ишлаб чиқилди. Унинг амалиётга қўлланилиши нефть ва газ қувурларининг бузилмасдан ишлаши муддатини ва узлуксиз фойдаланилиш самарадорлигини 12-14% гача ошириш имконини беради. Қувурни ётқизишнинг оптимал сатҳини аниқлаш қувурнинг деформацияланувчи муҳит билан ўзаро нозичикли таъсирини эътиборга олиш ҳисоби бажарилди, бу ўз навбатида меҳнат харажатлари ҳажмини 12-14% гача камайтириш имконини беради.

7. Метастабил ва криоген (хусусан, нефть ва газ) суяқликларни сақловчи қувур ва резервуарлар интенсив юкланган қисмларининг пластик юққаланиш соҳаларини аниқлаш услуби ишлаб чиқилди. Ушбу тадқиқотлар: импульсли ва гидродинамик юкланган тизимларнинг эластик-қайишқоқ деформацияланиш соҳаларини ишончли ва самарали аниқлашни; пластинка ва қобикларда тескари деформацияланиш ҳодисасининг қурилма кучланганлик ҳолатига таъсирини ҳисобга олишни таъминлайди.

8. Қурилмалар пластинка ва қобиксимон элементларининг эластик-қайишқоқ деформацияланишини ҳисобга олиш механизми ишлаб чиқилди. Бу соҳадаги тадқиқотлар ностационар гидроэластик-қайишқоқликнинг бир қатор масалаларини ечиш ва уларда содир бўладиган ўтиш жараёнларини моделлаштириш имконини беради.

9. Ишлаб чиқилган алгоритмлар ва сонли ҳисоб услуби қурилмалар элементларининг деформацияланувчи муҳит билан ўзаро мураккаброқ ностационар таъсирларини ҳисоблашга асос бўлади. Кавитацияланувчи ва қайновчи суяқликларнинг қабул қилинган моделлари ва тўсинларнинг суяқлик билан ўзаро таъсирининг сонли ҳисоби асосидаги бундай тадқиқотлар суяқликларни сақловчи ҳар хил қурилмалар, аппаратлар, резервуарлар ва қувурларни лойиҳалаштириш имконини беради.

10. Ишлаб чиқилган алгоритм ва услубларнинг дастурий таъминоти асосида: сонли алгоритмларнинг яқинлашиши ва самарадорлиги баҳоланди ва тест масалалар ечимлари таққосланди; ҳар хил фаразлар ва соддалаштиришларнинг ҳисоб натижаларига таъсири таҳлил қилинди; бир қатор икки ўлчовли нозичикли амалий масалалар ечилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ДОКТОРА НАУК DSc30.08.2018.FM/T.02.09 ПРИ САМАРКАНДСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

АБДИРАШИДОВ АБЛАКУЛ

**НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЛИНЕЙНО
ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
С ЖИДКОСТЬЮ**

01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА НАУК (DSc)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Самарканд – 2018

Тема докторской диссертации (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2017.3.DSc/FM82 по физико-математическим наукам.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице (www.samdu.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziynet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант:

Худойназаров Хайрулла
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мардонов Ботир
доктор физико-математических наук, профессор

Абдусатторов Абдусамад
доктор технических наук, профессор

Абиров Рустам Абдуллаевич
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

**Ташкентский институт инженеров
ирригации и механизации сельского хозяйства**

Защита диссертации состоится «5» января 2019 г. в 14:00 часов на заседании научного совета DSc30.08.2018.FM/T.02.09 при Самаркандском государственном университете по адресу: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (8366) 2351938. Факс: (8366) 2351938. E-mail: sasu_info@edu.uz.

С докторской диссертацией (DSc) можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета (регистрационный номер 78). Адрес: 140104, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (8366) 2351938. Факс: (8366) 2351938.

Автореферат диссертации разослан «21» декабря 2018 года.
(реестр протокола рассылки №1 от «21» декабря 2018 года).



Р.И.Халмурадов

Председатель научного совета по присуждению
ученой степени, д.т.н., профессор

Б.Хужаёров

Ученый секретарь научного совета по присуждению
ученой степени, д.ф.-м.н., профессор

К.Исмаилов

Председатель научного семинара
при научном совете по присуждению
ученой степени, д.т.н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В странах мира с развитой инфраструктурой атомной, нефтегазовой и аэрокосмической отраслей ведутся научно-исследовательские работы по изучению вопросов динамического взаимодействия различных резервуаров и труб с жидкостями, изменяющими свое фазовое состояние под воздействием температуры, сейсмических и техногенных нагрузок. Среди стран, занимающихся эксплуатацией таких систем, ведущими считаются США, Россия, Франция, Англия, Китай, Германия, Япония и другие государства, которые «...осуществляют до 80% строительство атомных станций, запусков ракетополетов, транспортировки и хранения нефтегазовых продуктов, производимых по всему миру. Ежегодно, в мире для обеспечения нормального функционирования этих инфраструктур расходуются несколько сотен миллиардов долларов США...."¹. В связи с этим одной из важнейших задач становится создание технологии транспортировки и хранения взрывоопасных жидкостей (например, метастабильных и криогенных жидкостей) на основе эффективных способов, обеспечивающих наряду с надежностью и безопасностью, снижение энергоемкости и ресурсосбережения в условиях процесса глобализации, увеличения требований к качеству носителей взрывоопасных жидкостей и газов.

В мире применяются модифицированные математические модели и методы расчета с целью увеличения прочности плит, пластин, оболочек, резервуаров и труб путем учета более сложных физико-механических свойств металлов и сплавов, создаваемых по заранее заданным характеристикам, и улучшения их качественных показателей. Осуществление в этой отрасли целевых научных исследований, в том числе научных поисков в следующих направлениях являются наиболее важными проблемами: разработка современных способов определения важнейших параметров жидкостей и материалов элементов конструкций с учетом механических свойств и качественных показателей; разработка новых эффективных методов расчета нестационарного взаимодействия упругих и упругопластически деформируемых элементов конструкций с метастабильными и криогенными жидкостями. В связи с этим востребовано разработка новых математических моделей, алгоритмов и программы ЭВМ для безопасных режимов нелинейного взаимодействия пластин и оболочек с взрывоопасными жидкостями и газами.

В нашей Республике особое внимание уделялось эффективному развитию нефтегазовой сферы, а также строительству трубопроводов большой протяженности для транспортировки нефти и газа. В данном направлении достигнуты большие результаты по укреплению резервной базы отрасли, улучшению качества продукции, применению современных

¹ Мехдиев Э.Т. Обзор трубопроводной инфраструктуры Европы: транспортировка нефти и нефтепродуктов // Энергетический вестник, №1, 2016. - С.108-119. Российское энергетическое агентство (РЭА), Международное энергетическое агентство (МЭА), <http://www.sci-books.org/>, <http://e-notabene.ru/energetika> и др.

интеллектуальных технологий, разработке технологий оптимального состава вторичных синтетических продуктов для насыщения внутреннего рынка сырьевыми ресурсами экспортировки. В стратегии по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы особо подчёркивается необходимость реализации целевых программ «...модернизация, техническое и технологическое обновление производства, реализация проектов производственной, транспортно-коммуникационной и социальной структуры; ... последовательное внедрение современных экономических и эффективных технологий ...»¹. Для выполнения этих задач, в частности, для повышения качества продукции, применение современных интеллектуальных технологий, развитие нефте-газо-перерабатывающих предприятие, заполняя внутренний рынок готовым сырьём с последующим их экспортированием, основными задачами является создание усовершенствованные математические модели и алгоритмы.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» №УП-4947 от 7 февраля 2017 г., Постановлениях Президента Республики Узбекистан №ПП-3190 от 9 августа 2017 года «О мерах по совершенствованию проведения научных исследований в области сейсмологии, сейсмостойкости строительства и сейсмической безопасности населения и территории Республики Узбекистан», «Об усовершенствовании системы управления нефте-газодобывающей промышленностью» №ПП-3107 от 30 июня 2017 года и «О мерах по обеспечению рационального использования энергетических ресурсов» №ПП-3379 от 8 ноября 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в настоящей сфере.

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

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации². Научные исследования, направленные на изучение взаимодействия конструкций с жидкостью или газом и на разработку методов расчета движения деформируемых тел в газе или жидкости, определения их динамической прочности при учете влияния окружающей среды, а также анализу влияния изменений механических характеристик материала пластин и оболочек на поведение элементов гидроупругой системы осуществляются в

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

² В обзоре международных научных исследований по теме диссертации использовались: 1. Galiev Sh.U., Flay R.G.J. Interaction of breaking waves with plates: The effect of hull cavitation Ocean Engineering 88 (2014) 27–33. 2. Избранные труды по гидроупругости и динамике упругих конструкций / Шмаков В.П. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 287 с. 3. Волны в сплошных средах / А.Г.Горшков и др. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 472 с. 4. Динамика конструкций гидроаэроупругих систем /К.Ф.Фролов и др. – М.: Наука, 2002. – 397 с., www.elsevier.com, www.springer.com, www.sciencedirect.com, www.mathnet.ru, www.elibrary.ru, www.math.msu.ru, www.webofsciences.com, <http://sci-hub.cc> и другие источники.

ведущих научных центрах и высших учебных заведениях мира, в том числе в Калифорнийском университете (США), Объединенном научном центре Европейской комиссии (Бельгия), Оклендском университете (Новая-Зеландия), Московском государственном университете, Московском авиационном институте, Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана, Санкт-Петербургском государственном университете, (Россия), Институтах прикладной механики и проблем прочности НАН Украины (Украина), Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз, Ташкентском государственном техническом университете и Самаркандском государственном университете (Узбекистан).

На основании исследований по нестационарному взаимодействию газовых, жидких и твердых деформируемых тел, осуществленных во всем мире, получен ряд результатов по: расчету упругопластических течений и разрушение твердого тела под воздействием взрыва в вакууме (Калифорнийский университет, Калифорния, США); исследованию взаимодействия системы трубопроводов со средой для сооружений нефтегазовой отрасли с транспортировкой опасных веществ (Объединенный научный центр Европейской комиссии, Бельгия); строению математической модели природных катастрофических нелинейных волновых явлений с учетом изменения фазового состояния жидкости (Оклендский университет, Окленд, Новая-Зеландия); изучению динамических процессов в твердых телах, конструкциях и многофазных средах, аналитический и численный анализ кавитационных режимов обтекания тел (Московский государственный университет, Москва, Россия); исследованию нестационарной аэрогидроупругости конструкций (Московский авиационный институт, Москва, Россия); изучению динамики нелинейных волн в гидроупругих конструкциях (Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия); исследованию нестационарной термогидроупругости, гидроупругие колебания и устойчивости конструкций (Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия); расчету движения деформируемых тел в газе или жидкости (Институт прикладной механики, Киев, Украина); изучению влияния изменения механических характеристик материала пластин и оболочек на поведение элементов гидроупругой системы (Институт проблем прочности, Киев, Украина); изучению взаимодействия подземных коммуникаций с грунтом и сейсמודинамики гидроупругих систем (Институт механики и сейсмостойкости сооружений, Ташкент, Узбекистан), изучению динамики нелинейных волн в гидроупругих конструкциях (Самаркандский государственный университет и Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан).

В мире проводится научные исследования по взаимодействию элементов конструкций с обычной, метастабильной и криогенной жидкостями по следующим приоритетным направлениям: нестационарное взаимодействие упруго- и упругопластически деформируемых элементов конструкций с жидкостью; исследование влияния кавитации, пузырьковой

кавитации и кипения жидкости, вызывающих нелинейное деформирование и разрушение взаимодействующего элемента; изучение нелинейного деформирования оболочек под действием импульсной и гидродинамической нагрузок; изучение влияния детонации взрывчатого вещества в жидкости или среде на упругопластическое поведение преград, находящейся в непосредственном контакте с ней.

Степень изученности проблемы. В мировой практике основными проблемами гидроупругопластичности являются взаимодействия конструкций с жидкостью или газом, расчет движения деформируемых тел в газе или жидкости, определения их динамической прочности при учете влияния окружающей среды, влияние изменения механических характеристик материала пластин и оболочек (в частности, учет вязкоупругости, пластичности и др.) на их колебания, динамические процессы в твердых телах, конструкциях и многофазных средах, аналитический и численный анализ кавитационных режимов обтекания тел и т.п. Решению этих проблем посвятили основные теоретические и практические исследования M.L.Wilkins, G.Maenchen, S.Sack, M.Amabili, A.D.Lucey, J.W.Kim, X.A.Рахматуллин, A.C.Вольмир, Ш.У.Галиев, A.Г.Горшков, Э.И.Григолюк, A.Н.Гузъ, Б.В.Замышляев, В.Д.Кубенко, M.A.Ильгамов, A.K.Перцев, Л.И.Слепян, В.Г.Баженов, Ю.С.Яковлев и другие ученые.

В разработке современных методов изучения взаимодействия подземных коммуникаций с грунтом и сейсמודинамики гидроупругих систем большой вклад внесли ряд узбекских ученых, в частности, M.T.Уразбаев, Т.Р.Рашидов, Т.Ширинкулов, Т.Мавлонов, Б.Мардонов, К.С.Султанов, M.Мирсаидов, X.Худойназаров и другие, в научных трудах которых данное направление получило своё дальнейшее развитие и дало положительные результаты в развитии отрасли и науки.

Однако в большинстве научных исследований не учтены влияния изменения фазового состояния высоконагретых и криогенных жидкостей в процессе их нестационарного взаимодействия с упругопластически деформируемыми оболочками на динамическую прочность резервуаров и трубопроводов. В частности, не проведены исследования, связанные с изучением взаимодействия двух находящихся в экстремальных условиях сред: жидкой, находящейся в метастабильном состоянии и твердой, находящейся в упругопластически деформированном состоянии, близком к потере прочности. Кроме того, не уделено достаточное внимание на исследование влияния возникающих критических явлений в гидроупругопластической системе на прочность оболочечных элементов конструкций. В настоящее время проблема нестационарного взаимодействия деформируемых твердых тел и оболочечных элементов конструкций со средой, в частности с жидкостью, при воздействии на конструкцию импульсных, гидродинамических и сейсмических нагрузок является актуальной задачей научно-практического направления.

Связь диссертационного исследования с тематическими планами научно-исследовательских работ. Диссертационное исследование

выполнено в соответствии с планами научно-исследовательских работ Самаркандского государственного университета «Исследование колебаний и устойчивости дискретно-непрерывных систем, взаимодействующих с деформируемой средой» (2000-2018 гг.), а также фундаментальными грантами №26/99 «Исследование распространения нестационарных волн в цилиндрических слоях и оболочках взаимодействующих с вязкой и метастабильной жидкостями» (1999-2003 гг.); №21/41 «Исследование взаимодействия элементов конструкций регулярной и нерегулярной структуры со средой и связанными полями» 2007-2011 гг.) и ряд хозяйственных работ.

Целью исследования является математическое моделирование и численное решение проблемы нестационарного взаимодействия упругопластически деформируемых и разрушаемых элементов конструкций (оболочек, пластин и плит) с жидкой средой, изменяющей своё фазовое состояние в процессе деформирования конструкций.

Задачи исследования:

изучение динамического взаимодействия элементов конструкций (оболочек, пластин и плит) с метастабильными и криогенными жидкостями;

определение НДС элементов конструкций с учетом пластических деформаций, вызванных действием гидродинамических нагрузок, заданных в пределах пространства занимаемой жидкостью;

исследование парадоксального явления существования остаточных прогибов металлических пластин в направлении, обратном действию нагрузки;

исследование задач по выявлению динамических деформационных процессов в элементах конструкций на изменения, динамику развития и появления новых фаз во взаимодействующих с ними жидкостях;

разработка численной методики расчета прочности подземных и подводных трубопроводных гидросооружений на основе волновой теории.

Объектом исследования являются одиночные и соосные цилиндрические оболочки конечной и бесконечной длины; гладкие и ступенчатые пластины и плита бесконечной длины; обычная, пузырьковая, метастабильная и криогенная жидкости.

Предмет исследования составляют изучение нестационарного взаимодействия деформируемых и разрушаемых одиночных и соосных цилиндрических оболочек конечной и бесконечной длины, упругопластических пластин и плит с пузырьковыми и метастабильными и криогенными жидкостями при воздействии внешних импульсных нагрузок и внутреннего источника волн давления.

Способы исследования. В диссертационной работе, ввиду сложности математической модели процесса динамического поведения элементов конструкций, взаимодействующих с окружающей средой, при определении динамической прочности гидроупругих конструкций использованы метод конечных разностей, основополагающие положения механики сплошных сред, гидродинамики и теории пластин и оболочек.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны эффективные расчетные модели взаимодействия упругопластически деформируемых трубопроводов с метастабильными и криогенными жидкостями при динамических нагружениях;

установлены зоны пластического утончения некоторой части трубопроводов (нефтяных и газовых), резервуаров хранения нефтепродуктов и конденсата на основе решения нелинейной волновой задачи гидроупругой системы;

численным решением задачи гидроупругости (нестационарное взаимодействие пластины, жидкости и быстрорасширяющего газового пузыря) определены возникновения остаточных прогибов металлических пластин в направлении, обратном действию нагрузки;

теоретически определены существования зоны закипания в метастабильных и криогенных жидкостях в процессе нелинейного деформирования стенок трубопровода и гидросооружений на основе численного решения задачи нелинейной гидроупругопластичности;

разработана численная методика расчета на прочность подземных и подводных трубопроводов на основе волновой теории гидроупругости.

Практические результаты исследования заключается в следующем:

разработана научно-техническая разработка на основе численной методики расчета эффективного и надежного использования элементов гидроупругих систем, экономии затрат и снижения их расходов;

разработаны алгоритмы с техническим требованием расчета гидроупругопластичности на основе численной методики определения условия прочности газопровода;

найжены зоны пластического утончения участков трубопровода, а это позволило определения значения действующих напряжений в точках произвольного сечения газопровода, по результатам которых проверено выполнения условий прочности материала.

произведен расчет с учетом нелинейного взаимодействия трубопровода с различными средами, определен оптимальный уровень прокладки труб, в результате, который решены различные задачи нелинейного взаимодействия трубопровода с деформируемыми средами.

Достоверность полученных результатов. Достоверность разработанных и предложенных автором математических моделей обеспечивается корректным применением математических выкладок к уравнениям механики сплошной среды, теории пластин и оболочек и гидродинамики, использованием надёжных и проверенных математических методов для нахождения решений системы дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа. В математических расчётах использовались современные лицензионные программы и пакеты программ. Используемые допущения и упрощения в постановках задач являются обоснованными. Полученные результаты не противоречат физической сущности явлений и подтверждаются, в частных случаях, сравнениями с известными результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость полученных результатов состоит в развитии теории упруго-пластического деформирования оболочечных элементов конструкций, взаимодействующих с жидкостью, находящейся в экстремальных условиях; в разработке эффективных расчетных моделей с учетом метастабильности и криогенности жидкости и пластического утончения элемента; в создании широкой базы для применения полученных результатов при решении прикладных задач, а также в возможностях обобщения разработанных методов на ряд родственных задач механики взаимодействия твердых, жидких и газо-образных сред, и на другие более сложные задачи гидроупругопластичности.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они создают необходимые предпосылки для научно-обоснованного проектирования и расчета подземных и подводных сооружений и сосудов различного размера, содержащих различные жидкости и газы, предназначенных для эксплуатации в условиях действия кратковременных и импульсных нагрузок.

Внедрение результатов исследования. На основе разработанной численных методик и алгоритмов, а также результатов созданных программ расчета нестационарного взаимодействия нелинейно деформируемых элементов конструкций с жидкостью:

расчетная методика повышения качества проекта расчета напряженно-деформированного состояния газовых труб, эффективного и надежно использование объектов внедрена в ООО «Мубарекнефтегаз» при АО «Узбекнефтегаз» (справка АО «Узбекнефтегаз» №02/12-1-92 от 7 мая 2018 г.). В результате исследований математического моделирования испытательных и приборно-технологических работ, алгоритм численного исчисления и программные научно-технические рекомендации, предопределяющие надежность системы газопроводов и вероятность отключения системы, снизили финансовые затраты на 10-14%;

методика численного расчета НДС газопровода, уложенного в песчаный грунт, внедрены в предприятие при АО «Узбекнефтегаз», в частности процессе проектирования в отделах КС и ИЛ предприятие ООО «Мубарекнефтегаз» (справка АО «Узбекнефтегаз» №02/12-1-92 от 7 мая 2018 г.). В результате оценки НДС газопроводов, уложенный в песчаный грунт из песчаной среды с определением возможных его просадок (прогибов), которая в конечном итоге привела к экономии затрат до 10%;

проверено состояние прочности материала газопровода и введено математическое выражение значения активного напряжения в точке по объемам газопроводов в процессе технического расчета в отделе КС и ИЛ ООО «Мубарекнефтегаз» (справка АО «Узбекнефтегаз» №02/12-1-92 от 7 мая 2018 года). В результате обнаружение участков пластической трещины в трубах позволило предотвратить возможность отказа системы и снизить вероятность отказа системы на 12-14%;

математическая модель, алгоритм и программа расчета нелинейного взаимодействия газопровода с деформируемой средой по определению оптимального уровня прокладки газопровода внедрены на практику при выполнении технического задания «Расчет НДС газопровода «Денгизкуль-МГПЗ» (справка АО «Узбекнефтегаз» №02/12-1-92 от 7 мая 2018 года). В результате удалось снизить трудозатраты на 12-14%.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования докладывались на 3 республиканских и 7 международных научно-технических и научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликованы всего 30 научных работ, из них одна монография, в научных изданиях, рекомендованных для публикации основных научных результатов докторской диссертации Высшей Аттестационной Комиссии Республики Узбекистан, изданы 10 статей, 7 из которых опубликованы в республиканских и 3 в зарубежных журналах, также получены 2 свидетельства о программных продуктах для ЭВМ (№DГУ 00893, №DГУ 00894).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 193 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность проведенных исследований, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризованы объекты, предметы, методы и гипотезы исследования, указано соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложены научная новизна, объяснены теоретическая и практическая ценность и достоверность исследования, раскрыты внедрения результатов исследования в практику, приведены информация о публикациях соискателя по теме диссертации и его личный вклад, апробация работы, данные по структуре и объему диссертации, краткое содержание глав диссертации.

Первая глава с названием **«Взаимодействие элементов конструкций с жидкостью. Состояние вопроса и основные соотношения»** посвящена освещению состояния проблемы, рассматриваемой в диссертации и основным соотношениям механики сплошной среды и теории полых оболочек с учетом пластических деформаций, используемые в дальнейшем при решении задач.

В первом разделе приведен обзор работ, посвященных исследованию взаимодействия элементов конструкций с жидкостью. В обзоре основное внимание уделено исследованиям, в которых в той или иной мере затрагиваются вопросы решения задач газогидроупругопластичности для разрушаемых сред и оболочек, включающих в себя исследование поведения подводных волн, нестационарного деформирования оболочек под действием импульсной нагрузки, динамического разрушения упругопластических тел и

жидкостей и нестационарного взаимодействия обычной, метастабильной и криогенной жидкостей с упругопластически деформируемыми элементами.

Во втором и третьем разделах приведены определяющие уравнения и соотношения механики сплошной среды, справедливые в весьма широком диапазоне изменения параметров среды, в том числе и для её жидкого и газообразного состояний. Выведены геометрически нелинейные уравнения движения пологих оболочек с учетом пластических деформаций в двух вариантах: на основе модели Кирхгофа-Лява и модели С.П.Тимошенко. При этом связь между перемещениями и деформациями учитывает деформации, вызванные радиальными перемещениями оболочки, изменением перемещений вдоль координатных линий и соответствующими деформациями изгиба.

Анализируя большое количество исследований, проведенных преимущественно за последнее время, сделаны выводы о том, что на данном этапе развития исследований в области гидроупругости наиболее перспективным является направление в котором изучаются задачи взаимодействия оболочечных и пластинчатых элементов инженерных конструкций с жидкими средами, изначально содержащими газовые пузырьки или закипающими в процессе деформирования конструкции; для исследования импульсного деформирования пластин и оболочек, нестационарно взаимодействующих с жидкой средой целесообразно использование численных методик, в частности, разностную схему М.Уилкинса, которая является наиболее рациональной, употребительной и удобной для практической реализации; сравнительный анализ весьма многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, опубликованных за последние несколько десятилетий подтверждает правильность основных выводов линейной теории. Вместе с тем обнаружены и качественно новые явления, присущие нестационарному взаимодействию деформируемых тел с жидкостью, объяснение которых в рамках линейной теории не представляется возможным. Поэтому, при решении указанных классов задач целесообразно применение нелинейных моделей с учетом возможно большего числа физико-механических свойств, в частности, пластических и температурных.

Во второй главе, с названием **«Моделирование задач нестационарной гидроупругопластичности»** дана математическая формулировка задач нестационарной гидроупругопластичности, исследуемых в рамках диссертации, разработан алгоритм расчета пластических деформаций пластин и оболочек взаимодействующих с жидкостью. Проведен сравнительный анализ различных моделей идеально-упругой, кавитирующей, пузырьковой, кипящей и криогенной жидкостей. Предложены упрощенная модель учета разрушения упруго-пластически деформируемого тонкостенного элемента конструкций и новая расчетная модель пузырьковой жидкости. Изучены одномерные колебания жидкости, возбуждаемые в результате вибрации одной из границ объема.

В первом разделе сформулирована общая постановка задач нестационарной гидроупругопластичности, подлежащие в дальнейшем решению в рамках диссертационной работы. Эти задачи отнесены к следующим двум основным

направлениям проблемы взаимодействия элементов конструкций с жидкостью:

а) Исследование формоизменения и разрушения пластин, взаимодействующих с жидкостью и их реакций на гидродинамическую нагрузку: моделирование прикладных задач формоизменения и разрушения пластин и плит; численное моделирование экспериментальных эффектов других авторов, в частности экспериментов, проведенных под руководством академика М.А.Лаврентьева для сравнительного анализа результатов.

б) Исследование возникновения и влияния кавитационных закипаний обычных, высоконагретых и криогенных жидкостей при различных (повышенных, нормальных, пониженных) температурных режимах на нестационарное поведение упругопластически деформируемых плит, пластин и оболочек. Для реализации этих задач взяты две соосные бесконечные цилиндрические оболочки, разделенные слоем жидкости. На внешнюю или внутреннюю поверхность конструкции приложена импульсная или гидродинамическая нагрузка.

Для описания нестационарного взаимодействия трех сред (твердое деформируемое тело, жидкость, газ) используются системы уравнений сплошной среды, которые включают в себя: уравнение сохранения массы $\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \bar{v} = 0$; уравнение сохранения импульса $\rho \frac{dv_i}{dt} = \nabla_j \sigma_{ij} + \rho F_i$, ($i, j=1, 2, 3$), где ρ - плотность среды; $\bar{v}$ - вектор скорости; v_i - компоненты вектора скорости; σ_{ij} - компоненты тензора напряжений ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$); F_i - массовые силы, характеризующие воздействие внешних объектов на среду.

Компоненты тензора скоростей деформации связаны со скоростями частиц дифференциальными зависимостями Коши.

Расчет тензора напряжений осуществляется на основе закона Гука:

$$\frac{d}{dt} s_{\alpha\alpha} = 2\mu \left(\frac{d}{dt} \varepsilon_{\alpha\alpha} - \frac{1}{3V} \frac{dV}{dt} \right), \quad (\alpha = z, r, \theta), \quad \frac{d}{dt} \tau_{zr} = \mu \frac{d}{dt} \varepsilon_{zr},$$

где μ - модуль сдвига. Переход от упругой деформации к пластической задается уравнением текучести Мизеса: $s_{zz}^2 + s_{rr}^2 + s_{\theta\theta}^2 + 2\tau_{zr}^2 = \frac{2}{3} \sigma_T^2$, где σ_T - предел текучести при простом растяжении. Рассматриваются такие случаи нагружения, при которых поведение малой частицы сплошной среды полностью определено, если известны выражения для девиатора напряжений s_{ij} и давление P через компоненты тензора скоростей деформации e_{ij} , компоненты метрического тензора $g_{\alpha\beta}$ и температуры T , а также некоторые дополнительные параметры $x_1, x_2, \dots, x_n$, меняющихся от задачи к задаче $s_{ij} = s_{ij}(e_{\alpha\beta}, g_{\alpha\beta}, \rho, x_1, x_2, \dots, x_n)$, $P = P(\rho, T, x_1, x_2, \dots, x_n)$, $\sigma_{ij} = s_{ij} - P\delta_{ij}$, $P = -\sigma_{ii}/3$.

Смесь в зонах взаимодействия и разрежения состоит из двух компонент - жидкости и газа, и используется подход, по которому смесь рассматривается как сплошная однородная среда, специфические свойства

которой учитывается уравнением состояния и модель невязкой нетеплопроводной жидкости и газа.

Второй раздел посвящен описанию модели разрушения упругопластического материала. При этом динамическое поведение оболочек описывается на основе уравнений геометрически нелинейной теории тонких оболочек типа Тимошенко $A \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial t^2} = B \frac{\partial \bar{W}}{\partial r} + C \bar{W} + \bar{q}$, где $\bar{W} = \{u, w, \psi, N_1, N_2, M_1, M_2, Q\}$ - вектор столбец неизвестных; $\bar{q}$ - вектор внешних сил; A, B, C - постоянные матрицы; N_i, M_i ($i=1,2$), Q - усилия, моменты и перерезывающая сила; u, w - перемещения; ψ - угол поворота поперечного сечения. Деформации в точках оболочки находятся в виде $\varepsilon_i = \varepsilon_i^0 + z \varepsilon_i^1$, ($i=1,2$), $\varepsilon_{13} = 1,5 \varepsilon_{13}^0 (1 - 4z^2/h^2)$, где z - нормальная координата от срединной поверхности ($-h/2 \leq z \leq h/2$); $\varepsilon_1^0, \varepsilon_2^0, \varepsilon_{13}^0$ - продольная, окружная деформация и деформация поперечного сдвига на уровне срединной поверхности; $\varepsilon_1^1, \varepsilon_2^1$ - угловые деформации. При вычислениях шаровой части напряжений для деформируемого твердого тела используется уравнение состояния $P(\eta) = a(\eta - 1) + b(\eta - 1)^2 + c(\eta - 1)^3$, которое устанавливает связь между средним напряжением σ (давлением P) и средней деформацией ε (плотностью ρ). Здесь $\eta = \rho_0 / \rho$; ρ_0 - начальная плотность материала; a, b, c - постоянные материала;

В третьем разделе анализированы различные модели динамического кавитационного и пузырькового разрушения жидких сред. Уравнение состояния для каждой среды (идеально-упругая, кавитирующая, пузырьковая, кипящая (уравнения Химпана и Кузнецова), метастабильная, криогенная) приведены в монографии автора.

В третьей главе с названием **«Динамическое деформирование цилиндрических и сферических тел, взаимодействующих с жидкостью»** представлен алгоритм расчета задачи взаимодействия трех сред: газа, жидкости и упругопластических тел; описан способ построения разностных сеток для интегрирования уравнений механики сплошных сред, в том числе уравнения движения упругопластически деформируемых оболочек, двумерный численный алгоритм, а также дано описание пакета прикладных программ, реализующих поставленные задачи гидроупругопластичности. С целью проверки достоверности и точности, применяемой математической модели и численной методики расчета решены несколько задачи, аналитические решения которых известны. При этом рассмотрены задачи упругого, упругопластического деформирования пологой сферической и круговой цилиндрической оболочки при импульсном нагружении; решена задача на исследование волновых процессов в цилиндрическом слое возбужденных внешним импульсным нагружением; изучены формирования и распространения подводных ударных волн от источника подводного взрыва и характер их отражения от свободной границы. Полученные результаты сравнены с известными аналитическими и численными результатами других исследователей.

В первом разделе предложен алгоритм численного решения задач нестационарного взаимодействия различных жидкостей с препятствиями, позволяющий решать важные, для приложений, задачи гидроупругопластичности. В частности, предложены методики численного интегрирования уравнений сплошной среды применительно к деформируемым твердым телам, уравнений гидродинамики и уравнений теории оболочек. Доказана необходимость численных экспериментов по выбору максимально допустимого шага по времени при решении нелинейных задач динамики оболочек. Описан созданный, по разработанным алгоритмам, пакет прикладных программ на алгоритмическом языке ФОРТРАН и ПАСКАЛЬ для современных вычислительных систем, позволяющий решать задачи гидроупругопластичности в двумерной постановке.

Во втором разделе решены задачи об импульсном деформировании сферической панели: задачи о деформировании сферической панели под действием внутреннего давления и задача о динамике формоизменения сферической панели при импульсном нагружении.

В третьем разделе решена задача о динамическом упругопластическом деформировании цилиндрической оболочки бесконечной длины, подвергнутой действию внутреннего радиального импульсного давления.

Четвертый раздел посвящен исследованию НДС и изучению волновой динамики в двухслойных цилиндрах, слои которых отличаются друг от друга только упругими свойствами. Радиальные напряжения, рассчитанные по различным методикам и при различных предположениях относительно распределения внешней нагрузки, практически не различаются между собой. Уменьшение (увеличение) площади приложения нагрузки несущественно сказывается на НДС в наиболее нагруженных участках конструкций.

В пятом разделе точность численного алгоритма и учет волновых процессов в газогидродинамических зонах расчета подтверждена решением задачи формирования и распространения гидроударных волн от подводного источника, отражением их от свободной границы, изучением влияния формы взрыва на динамику подводных волн. В шестом разделе изучен вопрос о влиянии гидроударной нагрузки на процесс деформирования резины, покрывающей жесткую границу, и распространения волн давления в гидроупругой системе. В седьмом разделе приведена расчетная модель изучения распространения нелинейных поверхностных волн в слоях осадочных пород в одномерной постановке.

В четвертой главе с названием **«Нестационарное взаимодействие пластин и плит с жидкостью при внутреннем и подводном взрыве»** путем численного эксперимента изучены процессы динамического деформирования и разрушения упругопластической пластины и плиты под давлением газового пузыря, расширяющегося в полубесконечном объеме жидкости или в плите. Проведен анализ изменения динамики нелинейного деформирования пластины и плиты при удалении источника волн давления от поверхности преграды или заглублении последнего в преграде. Сделаны качественные выводы о влиянии подводного взрыва на характер нелинейного

деформирования и разрушения пластины и плиты, а также влиянии преграды на волны давления в обычной, кавитирующей, пузырьковой или метастабильной жидкостях, в частности, численно моделирован эксперимент, проведенный под руководством академика М.А.Лаврентьева, где изучалась реакция металлических пластин на гидровзрывную нагрузку.

Общая постановка основных задач, решенных в рамках данной главы, реализована в первом разделе. Подробно описана сущность эксперимента М.А.Лаврентьева и парадоксальное поведение пластин в ходе проведения экспериментов. С целью численного исследования такого поведения пластин осуществлено численное моделирование задачи, которая разделена на несколько частных задачи. Описана последовательность решения общей проблемы, связанной с изучением парадоксального поведения пластин при гидровзрывной нагрузке.

Во втором разделе изучено влияние заглубления взрыва в плите на параметры ударной волны в жидкости и динамическую прочность преграды. Рассмотрен полубесконечной слой жидкости, покрытый металлической плитой, в которой расположен внезапно расширяющейся объем газа. Численно изучены параметры ударной волны в жидкости, возникающие в процессе заглубления источника взрыва в плите. При численных расчетах из плиты и воды выделены цилиндрические области, границы которых в некотором конечном промежутке времени не влияют на параметры исследуемых процессов. В начальный момент времени газовая область имеет форму цилиндра, ось симметрии которой совпадает с осью симметрии выделенных объемов плиты и воды.

Расчеты проведены для плиты из алюминия (АМГ-6): модуль упругости $E = 71500$ МПа, модуль линейного упрочнения $E_1 = 1500$ МПа, предел упругости $\sigma_T = 275$ МПа, плотность материала $\rho = 2800$ кг/м³, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$ и стали: $E = 200000$ МПа, $E_1 = 1800$ МПа, $\sigma_T = 400$ МПа, $\rho = 7500$ кг/м³, $\nu = 0,25$ плиты толщиной 1 м. Толщина и диаметр пентолитового заряда равны 0,2 м. Рассчитаны пять вариантов заглубления взрыва в плите: $d = 2/8; 3/8; 4/8; 5/8; 6/8$ относительно толщины плиты. Разрушение плиты происходит как вблизи свободной поверхности, так и вблизи контакта плиты с жидкостью.

Полученные результаты позволили установить зоны разрушения в материале преграды развиваются в области прилегающих к обеим тыльным поверхностям плиты и далее распространяются от оси симметрии; заглубление взрыва в плиту и увеличение плотности материала преграды приводит к уменьшению амплитуды волны давления в жидкости; в жидкости формируются волны давления распространяющиеся по оси симметрии вида $P = P_0 e^{\beta(ct+z)} (1 - e^{\alpha(ct+z)})$, где P_0 , α , β - амплитуда, скорость роста и последующий спад давления в волне; $\alpha = -1/L_1$; $\beta = -1/(L - L_1)$; L - длина волны; L_1 - расстояние до пикового значения; c - скорость волны давления в жидкости; t - время; z - координата; во всех вариантах спад давления вблизи плиты резкий, а далее происходит по закону, установленному для сферических волн.

В третьем разделе проведены численные эксперименты с пластиной ступенчато-переменной толщины, нагруженной взрывом в жидкости. Контурная толстая часть моделирует влияние бака. В экспериментах стенки бака деформировались и исходя из этого в дальнейшем задавалась толщина контурной части пластины.

Расчет параметров жидкости велся согласно одной из трех моделей: идеально упругой, при этом уравнение состояния записывалось в форме Тэта; разрушаемой, при этом предполагалось, что в зонах разрежения жидкость может переходить в двухфазное состояние и для нее справедливо широкодиапазонное термическое уравнение Н.В.Кузнецова; пузырьковой, при этом для нее принято уравнение состояния, предложенное во второй главе. Расчеты проведены для случаев, когда начальное давление в газовом объеме составляет 5; 10; 20 МПа, а плотность 1650 кг/м³; пластина переменной толщины (0,001 м; 0,0007 м) с радиусом 0,055 м.

Основной объем численных экспериментов был выполнен по модели кавитирующей жидкости, так как она реализует быстрый сброс давления, необходимый для обратного выхлопа пластины. В основном деформируются центральная часть пластины, причем средняя скорость обратного выхлопа приблизительно в два раза выше средней скорости достижения максимального положительного прогиба. Выворачивание пластины происходит в данном случае, видимо, в первую очередь за счет упругой энергии толстой части пластины. Также проведено исследование деформирования тонкой пластины при отсутствии внешней нагрузки с учетом пузырьковой кавитации в жидкости.

Исследование формоизменения преграды при импульсном и гидродинамическом нагружениях приводило к следующим выводам: пластина возможно получить прогибы, направленные против действия нагрузки; моментные усилия в пластине не устраняют возможность обратных выхлопов; выхлопы возможны в достаточно широком диапазоне изменения параметров нагружения и геометрии пластин; модель закипающей и идеально-упругой жидкостей не позволяет рассчитать процесс выворачивания пластин под действием подводного взрыва; возможны динамические потери устойчивости процесса упругопластического деформирования гладкой и ступенчато переменной толщины пластинчатого элемента газогидроупругопластической системы в результате малого изменения характера нагружения.

Таким образом, впервые численно моделировано эксперимент М.А.Лаврентьева и доказана возможность обратного (против действующей нагрузки) формоизменения пластины в широких пределах мощности взрыва, геометрии конструкции, модели жидкости и препятствия.

В пятой главе с названием **«Нестационарное взаимодействие цилиндрических оболочек с пузырьковой, кавитирующей, высоконагретой и криогенной жидкостью»** изучено импульсное деформирование металлических соосных цилиндрических оболочек, взаимодействующих через жидкость, при непосредственном приложении нагрузки к части внешней по-

верхности конструкций. Анализируются влияния уменьшения (увеличения) участка нагружения, нелинейности уравнений гидродинамики и разрушения жидкости на деформированное состояние рассматриваемой гидроупругой системы. Изучено влияние нестационарной кавитации, динамики пузырьковой, метастабильной и криогенной жидкостей на упругое и упругопластическое деформирование элементов гидроупругой системы. Для описания поведения жидкости использованы различные замыкающие уравнения (см.2.3).

В первом разделе описаны постановки этих краевых задач.

Во втором разделе изучена реакция двух коаксиальных цилиндрических оболочек, разделенных слоем жидкости, на действие импульсной нагрузки. По результатам численных экспериментов установлено: размеры участка нагружения внешней оболочки в системе коаксиальных цилиндрических оболочек, разделенных жидкостью, существенно влияет на деформирование внешней оболочки, а прогибы внутренней оболочки не зависят от способа приложения внешнего участка импульсной нагрузки, но растут при увеличении площади внешнего участка приложения нагрузки; влияние нелинейности уравнений гидродинамики на прогиб оболочки растет с увеличением амплитуды нагрузки, причем оно более заметно для внутренней оболочки чем для внешней; влияние кавитации при принятых нагрузках и параметрах оболочек вызывало уменьшение прогиба внешней оболочки и увеличение прогиба внутренней оболочки, т.е. присутствие жидкости в межоболочечном пространстве при внешнем импульсном нагружении более опасно для внутренней оболочки, чем внешней. Результаты численного эксперимента показали возможность управления поведением элементов гидроупругой системы со снижением интенсивности волн, падающих на препятствие. Внутреннее импульсное нагружение, через передающие нагрузку среды, может вызывать интенсивное утончение внешней оболочки, которое может привести к разрушению конструкции (рис.1).

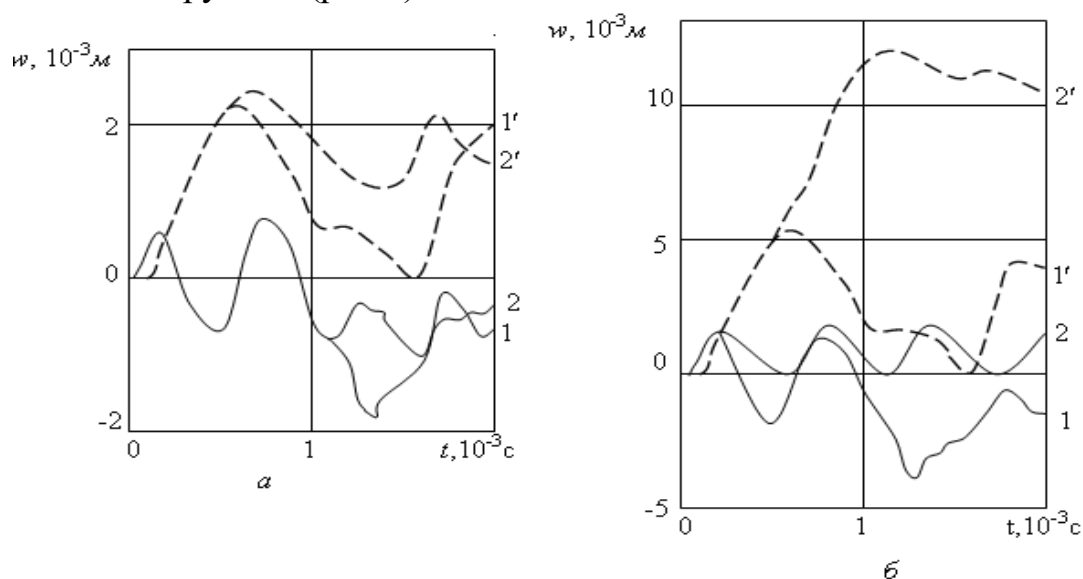


Рис.1. Влияние пузырьковой кавитации в жидкости на пластическое деформирование оболочек при $q_0=20$ (а) и $q_0=50$ МПа (б): кривые 1,2 - прогибы внутренней и 1', 2' - прогибы внешней оболочки, рассчитанные по моделям кавитирующей и пузырьковой жидкости.

Сопоставлению результатов, полученных по моделям идеально-упругой, кавитирующей, пузырьковой, метастабильной и криогенной (азот, кислород, гелий) жидкостей, решению задачи гидроупругопластичности для случая высоконагретой жидкости, близкое к состоянию кипения и анализу влияния процесса вскипания жидкости и наличия газовых объемов в них на деформирование и разрушение цилиндрических оболочек посвящена третья по пятым разделам данной главы. Рассматриваются задачи по изучению поведения двух коаксиальных цилиндрических оболочек, разделенных различными жидкостями (или жидкостью, находящейся в различных состояниях) при действии внешних импульсных нагрузок. Движения оболочек описываются уравнениями моментной теории. Поведение жидкости описывается уравнениями неразрывности и движения, а также замыкающими уравнениями гидродинамики, приведенные в п.2.3 и справедливые в широком диапазоне температуры и давления.

В третьем разделе решена задача о деформировании двух коаксиальных цилиндрических оболочек, разделенных водой в случаях нормальной температуры, в нагретом и кипящем состояниях. Импульсная нагрузка задавалась как в п.4 г.3. Расчеты произведены для стальных оболочек с радиусами, равными 0,5 м и 1,0 м, и толщиной 0,01 м и 0,005 м соответственно, для нормальной температуры. Статическое давление в жидкости принимали равным 1 МПа. Рассчитаны с помощью модели упругой жидкости согласно уравнению Тэта (алгоритм 1), по модели кавитирующей жидкости (алгоритм 2), с привлечением уравнений Кузнецова (алгоритм 3), по уравнениям Тэта и уравнение Химпана в зонах сплошной и двухфазной жидкостей соответственно (алгоритм 4). Прогибы внешней оболочки, рассчитанные по различным алгоритмам, друг от друга не отличаются. Иная картина имеет место в случае внутренней оболочки. Низкие точности расчетов с помощью модели идеально упругой жидкости. На рис.2 изображены кривые прогибов лобовых точек внешней толщиной 0,01 м и внутренней, толщиной 0,02 м оболочек, при состоянии воды, близком к кипению при температуре $T_0 = 555,22^\circ\text{K}$. Соответствующие термодинамические параметры для жидкой и парообразной фазы воды известны. Кривые рассчитаны при $P_0=10$ МПа и $q_0 = 30; 60$ МПа. Процесс перехода воды от однофазного состояния к двухфазному рассчитывали на основе четырех различных алгоритмов. Представляет интерес проанализировать закономерности изменения давления в жидкости при учете возникновения кипения. Процесс кипения ограничивает падение давления в жидкости.

Далее исследовано поведение двух коаксиальных металлических цилиндрических оболочек, разделенных высоконагретой жидкостью, близкой к кипению, при приложении внешней импульсной нагрузки к части поверхности конструкции. Анализировано влияние уменьшения (увеличения) участка нагружения на деформированное состояние оболочечных элементов рассматриваемой гидроупругой системы.

Расчеты проведены для стальных оболочек, радиус, который 0,5 м и 1 м, с толщиной соответственно 0,02 и 0,01 м. На рис.3 приведены кривые

радиальных прогибов лобовых точек (a - внешней, b - внутренней) оболочек рассчитанные для нагретой жидкости, близкой к состоянию кипения, при нагрузке амплитудой 30 МПа по внешней поверхности конструкции. На рисунке точка на оси абсцисс соответствует моменту окончания действия нагрузки. Следовательно, время деформирования конструкции намного превышает время нагружения. Начальное деформированное состояние стенок резервуара определено с учетом только статического давления внутренней жидкости. Цифры 1-5 соответствуют углам нагружения $180^\circ, 120^\circ, 60^\circ, 30^\circ, 15^\circ$.

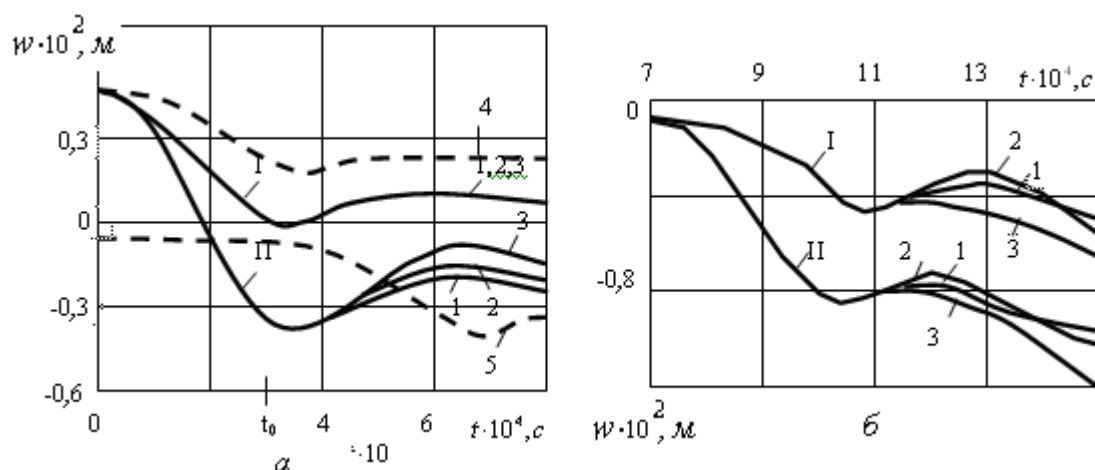


Рис.2. Сравнение прогибов оболочек, рассчитанных на основе различных алгоритмов перехода воды от однофазного состояния к двухфазному при $T=555,22\text{K}$: I - $q_0=30$ МПа; II - $q_0=60$ МПа; 1 - алгоритм 1 - уравнения Кузнецова; 2 - алгоритм 2 - уравнения Тэта (в зонах отсутствия кипения) и Химпана (в зонах кипения); 3 - алгоритм 3 - уравнения Тэта (в зонах отсутствия кипения) и уравнения кипящей жидкости (в зонах кипения); 4, 5 - алгоритм 4 - уравнения Тэта (в зонах отсутствия кипения) и Кузнецова (в зонах кипения).

Оказалось, что величина площади нагружения неодинаково влияет на характер прогибов внешней и внутренней оболочек. Прогиб внешней оболочки с уменьшением площадки нагружения в начале растет, достигает своего максимума (кривая 4) и далее уменьшается (кривая 5). Это связано с тем, что при большой площадке нагружения напряженное состояние близко к безмоментному, а при малой площадке приложенного импульса недостаточно для значительного деформирования конструкций. Максимальные перемещения имеют место, когда существен импульс сил, а напряженное состояние оболочки далеко от безмоментного (кривые 3 и 4). Для внутренней оболочки анализируемая зависимость имеет более простой вид, а именно: максимальный прогиб снижается с уменьшением площадки нагружения.

Исследованию нестационарного деформирования двух соосных цилиндрических оболочек, разделенных высоконагретой жидкостью, под действием источников волн давления в жидкости посвящен продолжение этого раздела. Рассмотрено влияние закипания жидкости в волнах разрежения на поведение, ограничивающих эти среды, оболочек. Влияние температуры самих оболочек на их деформирование не учитывается. Радиус и толщину внутренней оболочки полагали равными 0,5 и 0,01 м, внешней - 1 и 0,01 м, соответственно. Пусть при $t=0$ температура воды везде, за

исключением некоторых объемов - источников возмущения - составляет 500°K , а $P_0=5$ МПа. Начальные температура и давление среды в указанных объемах равны 600°K и 20 МПа соответственно. Источники возмущений расположены посередине между оболочками.

Численное исследование картины распространения возмущений по жидкости показало, что вскипание в случае одного источника происходит в окрестности лобовых точек оболочек вследствие деформации стенок. Зоны закипания распространяются вместе с волнами деформации по оболочкам. При наличии двух источников зоны закипания, кроме отмеченных, возникают в объеме жидкости между источниками. Это связано с тем, что сталкиваются два гидроудара движущихся от источников, затем образуются зоны разрежения в местах соударения.

В четвертом разделе решена задача о динамическом поведении конструкции, состоящей из двух стальных соосных цилиндрических оболочек, взаимодействующих через кипящую жидкость. Конструкция подвергается действию осесимметричного радиального импульса давления, приложенного к внутренней поверхности. Геометрические характеристики оболочек: $R_1 = 0,5$ м; $R_2 = 0,75$ м; $h_1 = h_2 = 0,005$ м. Амплитуда нагрузки варьировалась. Интенсивность нагрузки во времени изменялась по закону равнобедренного треугольника с основанием $(R_2 - R_1)/c$, где c - скорость распространения звука в воде.

Расчеты проведены для упругой и упругопластической оболочек, взаимодействующих с метастабильной жидкостью с характеристиками $P_0 = 0,1$ МПа; $\rho_0 = 982$ кг/м³; $T_0 = 293^{\circ}\text{K}$. Предположено, что температура окружающей среды изменяет пластические характеристики материала оболочки: $\sigma_t = 200; 300$ и 400 МПа. Амплитуда нагрузки составляло 30 МПа. Результаты показывают, что полученные результаты по модели кипящей жидкости (уравнение Кузнецова), близки к результатам, полученным по модели идеально-упругой жидкости. Это объясняется тем, что уравнение Кузнецова обобщает уравнение Тэта в случае жидкости нормальной температуры. С увеличением предела текучести материала конструкция ведет себя как упругая.

Также были проведены расчеты для гидроупругопластической системы с расчетными данными для жидкости со следующими начальными характеристиками: $P_0 = 10$ МПа; $\rho_0 = 750,5$ кг/м³; $T_0 = 555,22^{\circ}\text{K}$. Расчеты показали, что увеличение температуры окружающей среды более опасно для внешней оболочки чем для внутренней. Численное исследование картины распространения возмущений в метастабильной жидкости показало, что вскипание происходит в окрестности лобовых точек оболочек, вследствие деформации стенок резервуара. Зоны закипания распространяются вместе с волнами деформации по оболочкам и глубине жидкости. Проведены численные расчеты динамики пластического утончения оболочек, изготовленных из различных материалов. Были проведены расчеты для внутренней и внешней оболочки с характеристиками: $\sigma_t = 400$ МПа, $\sigma_p = 600$

МПа для стали ($E_1 = 500$ МПа), 16АТ ($\sigma_t = 100$ МПа, $\sigma_p = 350$ МПа; $E_1 = 1500$ МПа) и БрКМЦ ($\sigma_t = 200$ МПа, $\sigma_p = 400$ МПа; $E_1 = 1000$ МПа), а также для стали с учетом ее температуры ($\sigma_t = 200$ МПа) при $q_0 = 50$ МПа.

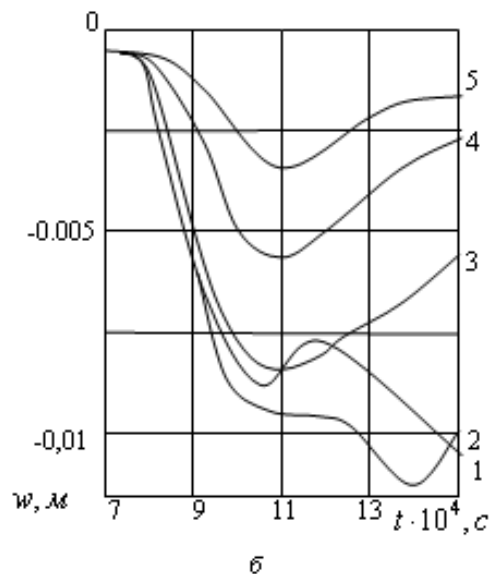
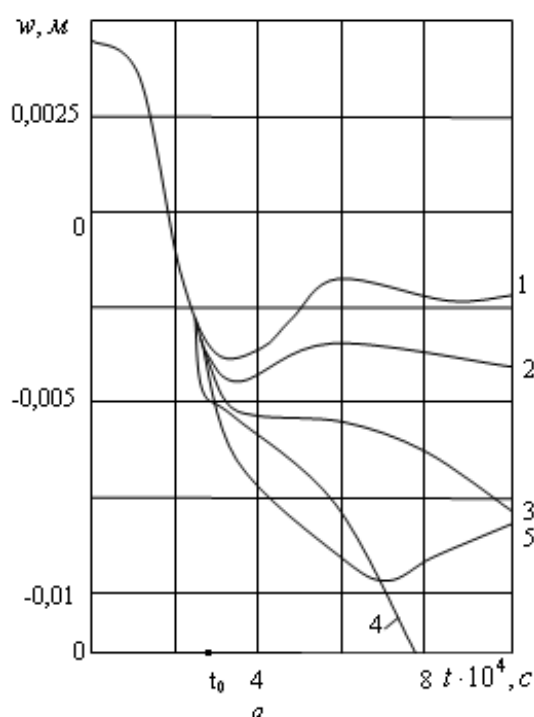


Рис.3. Влияние изменения площади нагружения на изменение прогибов лобовых точек внешней (а) и внутренней (б) оболочек: 1– $\theta = 180^\circ$; 2– $\theta = 120^\circ$; 3– $\theta = 60^\circ$; 4– $\theta = 30^\circ$; 5– $\theta = 15^\circ$.

Пластическое утончение стенок оболочек начинаются в лобовой точке с дальнейшим распространением от неё. Уменьшение интенсивности нагрузки приводит к последовательному приближению упругопластического деформированного состояния оболочек к упругой. Из этих результатов следует, что увеличение температуры окружающей среды и учет температуры самой конструкции, а также уменьшение прочностных характеристик материала оболочек приводит к интенсивному росту пластического утончения стенок резервуара и последующему разрушению конструкции.

В заключительном, пятом разделе главы исследовано влияние закипания криогенных жидкостей (сжиженных гелия, азота, кислорода) в волнах разрежения на поведение, ограничивающих эти среды, цилиндрических оболочек. Влияние температуры самих оболочек на их деформирование не учитывается. Радиус и толщину внутренней оболочки полагали равными 0,75 м и 0,002 м, внешней - 1 м и 0,01 м соответственно. Начальное давление для каждой жидкости на 1/10 превышало давление насыщения P_H , а начальная температура составляла $4T_{кр}/5$. Значения P_H определяли для каждой среды, исходя из начальных значений температур согласно справочным данным.

На рис.4 изображены кривые прогибов лобовых точек оболочек, рассчитанные для нагрузки с амплитудой 30 МПа. Как видно, наблюдается сильная зависимость характера деформирования внешней оболочки от заполняющей жидкости. В целом можно отметить, что величина прогиба тем больше, чем меньше плотность жидкости. Вместе с тем прогиб внутренней оболочки меньше прогиба внешней оболочки, что зависит от свойств жидкости. Это

связано с особенностью генерирования внешней оболочкой волн в различных жидкостях.

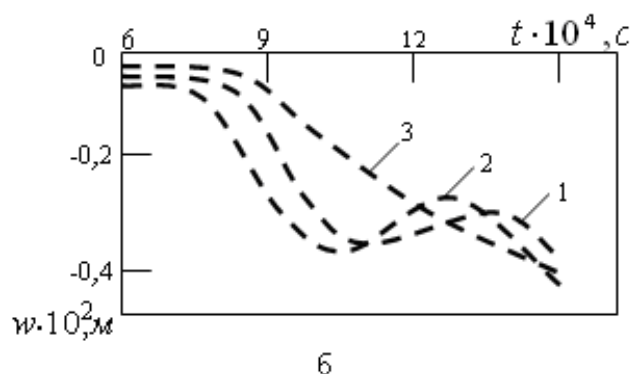
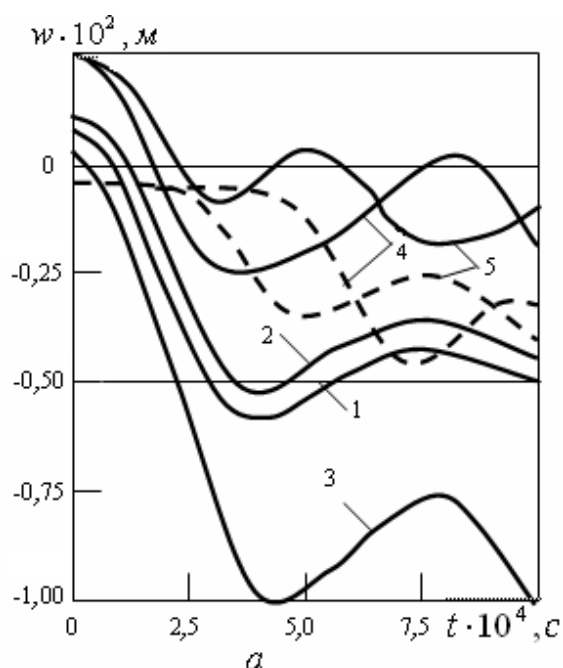


Рис.4. Влияние закипания криогенных жидкостей на прогибы лобовых точек внешней (сплошные линии) оболочек и внутренней (штриховые линии) оболочек: 1- азот; 2- кислород; 3- гелий (на рис. б в интервале 0.0026 ... 0.0035 с); 4- вода при $T=517\text{ K}$ ($P_H=3,59\text{ МПа}$); 5- вода при $T=0$ (кавитация не учитывается).

Сравнены кривые давления, рассчитанные вблизи лобовой точки внутренней оболочки для азота, кислорода, гелия, кипящей воды и воды в нормальных условиях. Несмотря на значительные различия в свойствах жидкостей, амплитуды и формы, возбуждаемых в них волн, отличаются несущественно. Некоторым исключением является гелий, для которого амплитуда волны приблизительно в четыре раза меньше возбуждаемых в других жидкостях. Однако длина этой волны почти в два раза превышает таковую в кислороде и азоте.

При высокоскоростном деформировании оболочек, граничащих с метастабильной или криогенной жидкостью, которая близка к состоянию перехода от однофазного к двухфазному, в жидкости возможно появление кипения. Исходя из этого, далее основное внимание было уделено анализу влияния зоны действия и амплитуды импульса, процессу кипения высоконагретой жидкости и сжиженных газов (азот, кислород, гелий) на нелинейное взаимодействие сплошных сред и волновых процессов в гидроупругопластических системах.

Численные расчеты показали, что: эффективным алгоритмом учета однофазных и двухфазных состояний жидкости является широкодиапазонное уравнение Кузнецова и учет кавитационных явлений в жидкости, так как они более просты для численной реализации и обеспечивают более высокую скорость решения задач на ПЭВМ. Кроме того, уравнение Кузнецова обобщает уравнение Тэта в случае давлений, достигающих до 10000 МПа; скорость звука, вычисленная согласно уравнению Тэта, намного выше, чем в нагретой жидкости, поэтому прогиб внутренней оболочки, рассчитанный при нормальной температуре, начинает расти быстрее, чем в случае нагретой жидкости.

Динамическое поведение оболочек при уменьшении площадки нагружения в целом соответствует расчетам, выполненным без учета закипания жидкости, но отличается в амплитудах прогибов оболочек; наличие закипающих обычных и криогенных жидкостей в резервуаре не позволяет падению амплитуды волн давления в жидкости до значительных отрицательных величин; наличие теплового взрыва внутри гидроупругой системы приводит к вскипанию жидкости в окрестности лобовых точек оболочек, вследствие деформации стенок и эти зоны закипания распространяются вместе с волнами деформации по оболочкам и по столбе жидкости, а наличие двух источников зоны закипания, кроме отмеченных, возникают в объеме жидкости между источниками, в связи со столкновением двух гидроударных волн движущихся от источников и образуется зон разрежения в местах соударений. Резюмируя все сказанное выше можно заключить, что в рамках данной главы разработаны подходы, численные алгоритмы и численная методика, позволяющие решать сложные задачи взаимодействия жидкостей, находящихся в условиях экстремальных давлений и температур, с оболочками.

В шестой главе с названием **«Нелинейное упругопластическое деформирование цилиндрической оболочки конечной длины, взаимодействующей с жидкостью»** численно исследован процесс упругопластического деформирования цилиндрической оболочки конечной длины при воздействии на нее импульсной и гидродинамической нагрузок. Расчеты оболочки проведены для упруго и упругопластически деформируемых моделей на основе теорий Кирхгофа-Лява и Тимошенко. Дана сравнительная оценка методики численного решения поставленной задачи. Анализированы влияние времени действия нагрузки, ее интенсивности и амплитуды, а также геометрических и механических характеристик тела на нестационарное поведение гидроупругопластической системы.

В первом разделе даны постановки две задач нестационарной гидроупругопластичности: процесс нелинейного упругопластического деформирования пологой цилиндрической оболочки конечной длины под действием внутренней импульсной нагрузки, приложенной на внутреннюю поверхность; нестационарное взаимодействие упругопластической оболочки конечной длины, содержащейся деформируемой жидкой средой при импульсном и гидродинамическом нагружении.

Во втором разделе приведены необходимые уравнения нелинейной теории тонких цилиндрических оболочек конечной длины, основные к гипотезам Кирхгофа-Лява, а далее численный конечно-разностный алгоритм в форме неявной схемы их решения. Изучено влияние линейности и нелинейности уравнений движения оболочки, краевых условий (относительно усилия и момента), а также геометрических размеров (толщина, длина и радиус оболочки), физико-механических параметров (сталь, Д16АТ, БрКМц) и формы нагрузки (равнобедренный треугольник, синусоидальный) на характер деформирования оболочки. Расчеты показывают, что: учет нелинейности уравнений колебания оболочки по неявной схеме дает уменьшенные значения амплитуды колебаний и увеличенные значения ее частоты (рис.5); уменьше-

ние толщины и длины оболочки и увеличение ее радиуса приводит к увеличению амплитуды упругих колебаний; учет пластических свойств материала показывает, что с увеличением нагрузки перемещения растут без ограничений; учет пластических свойств материала приводит к увеличению прогиба почти в два раза (рис.6); рост длины и амплитуды падающего импульса приводит к увеличению упругопластических прогибов центральной точки оболочки во времени; длина оболочки и небольшое отклонение в механических свойствах материала мало влияют на прогиб центра, а увеличение радиуса и толщины сопровождались ростом прогибов.

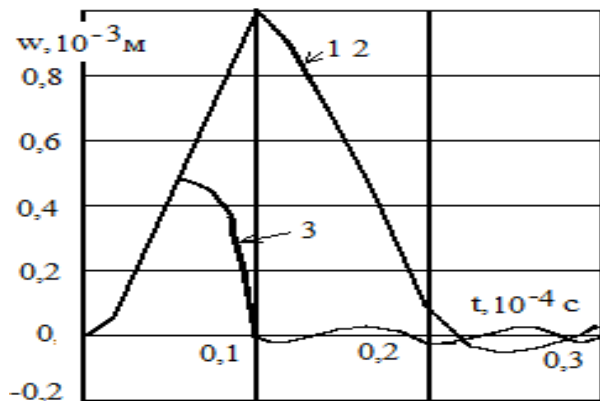


Рис.5. Упругие прогибы центральной точки оболочки, вычисленные на основе уравнений: линейных (кривая-1); нелинейных (кривая-2) уравнений по явной схеме и нелинейных уравнений по неявной схеме (кривая-3).

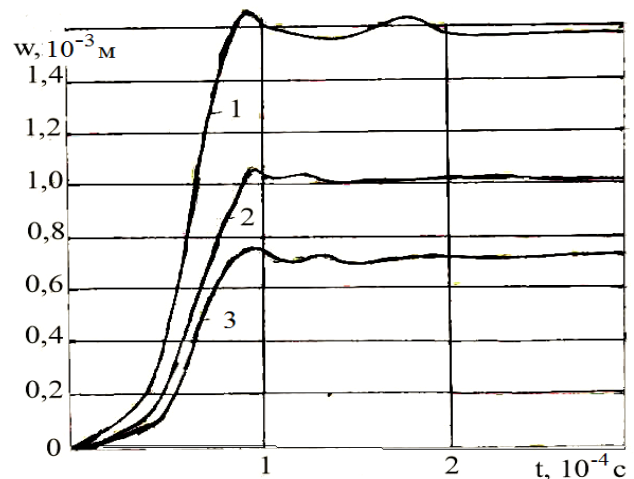


Рис.6. Влияние изменения параметров материала оболочки (кривая 1-Д16АТ, кривая 2-БрКМц, кривая 3 – сталь) на упруго-пластические прогибы ее центральной точки.

Таким образом, расчеты показали, что изменение шага учетов накопления пластических свойств материала мало влияло на остаточный прогиб. Максимальные пластические прогибы были на 30-40% больше чем максимальные упругие прогибы. Зона пластичности локализовалась у центральной точки оболочки. Оболочка в результате действия импульсной нагрузки приобретает форму бочки. Результаты линейного и нелинейного расчетов различаются достаточно сильно. Учет пластических свойств материала существенно влияет на характер деформирования конструкции.

В третьем разделе основные соотношения геометрически нелинейной теории С.П.Тимошенко для тонких цилиндрических оболочек конечной длины, уравнений гидродинамики с различными моделями жидкости (пузырьковой - модель 1; кавитирующей - 2; Тэта - 3; Кузнецова - 4), а также численный конечно-разностный алгоритм в форме неявной схемы их решения. В качестве примера изучена реакция стальной цилиндрической оболочки конечной длины на действие внутренней гидродинамической нагрузки возникающей при подрыве цилиндрического заряда ВВ, расположенного вдоль оси цилиндра, заполненного жидкостью, а в случае отсутствия жидкости насчитается, что на внутреннюю поверхность конструкции воздействует кратковременный импульс. Геометрические размеры оболочки: $R = 0,014$ м; $h = 0,001$ м; $L = 0,2$ м. Характеристики

материала следующие: $E = 200000$ МПа; $\nu = 0,25$; $\rho = 0,00785$ кг/м³; $\sigma_t = 400$ МПа; $E_1 = 500$ МПа. Края оболочки свободны.

Расчеты показывают, что: пластичность приводит к уменьшению амплитуды волны давления в жидкости; модели пузырьковой и кавитирующей жидкостей дают близкие результаты, а модель Тэта - с моделью Кузнецова; влияние изменений параметров материала и геометрии оболочки несущественно для устойчивости вычислений; пошаговый учет накопленной пластической деформации оболочки существенно влияют на прогибы ее центральной точки.

Оболочка в результате действия импульсной нагрузки приобретает форму бочки. Результаты линейного и нелинейного расчетов различаются достаточно сильно. Учет пластических свойств материала существенно влияет на характер деформирования конструкции. В процессе расчетов установлены, что действие гидродинамической нагрузки порождает в рассматриваемой гидроупругопластической системы сложное НДС. Влияния параметров нагрузки и состояние среды существенно для оценки прочности и несущей способности оболочки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных научных исследований по докторской диссертации на тему «Нестационарное взаимодействие нелинейно деформируемых элементов конструкций с жидкостью» представлены следующие основные выводы:

1. Развита теория нестационарного взаимодействия оболочечных элементов конструкций с жидкой и газообразной средой на случай учета нелинейных и упругопластических их деформаций при взаимодействии с метастабильными и криогенными жидкостями.

2. Предложена эффективная математическая модель взаимодействия трех сред (твёрдого тела, жидкости и газа) и разработан метод численного решения нового класса задач механики взаимодействия упругопластически деформируемых плит, пластин и оболочечных элементов конструкций с различными жидкостями. Метод основан на использовании геометрически нелинейных соотношений Коши по модели Тимошенко, численного алгоритма Уилкинса и пошаговом учете пластических деформаций.

3. Разработан и реализован метод численного решения двумерных задач нестационарного взаимодействия нелинейно деформируемых плит, пластин и оболочек с кавитирующими и закипающими в волнах разрежения жидкостями, содержащими источники волн давления для случая скользящих граничных условий. Данный метод позволяет исследовать влияние кавитации, пузырьковой кавитации и закипание жидкостей на НДС конструкции и учета возможности уменьшения амплитуды гидроударных волн.

4. Разработана технология численного решения задач упругопластического деформирования и разрушения изотропных плит, пластин и оболочек, взаимодействующих кавитирующими и вскипающими жидкостями, содер-

жащими газовые объемы, при импульсных и гидродинамических нагружениях. Полученные результаты позволили обнаружить, что наличие крупных газовых объемов в жидкости сильно влияют на нелинейное деформирование плит, пластин и оболочек, в частности, предотвращает увеличения зоны пластичности тонкостенной части конструкции в нелинейной постановке относительно линейной.

5. Исследован процесс влияния возникновения фазовых переходов в различных жидкостях на упругопластическое деформирование взаимодействующих пластин и оболочек. Данное исследование позволило установить, что учет явления кавитации и пузырьковой кавитации в жидкости и закипания метастабильных и криогенных жидкостей в волнах разряжения является обязательным условием динамического расчета прочности элементов конструкций.

6. Разработана численная методика расчета на прочность подземных и подводных трубопроводов на основе волновой теории. Её практическое применение служит для повышения срока службы на 12-14%, безаварийной и бесперебойной эксплуатации трубопроводов. На основе предложенного алгоритма произведен расчет с учетом нелинейного взаимодействия трубопровода с грунтом, определяющий оптимальный уровень прокладки труб, а это снижает трудозатраты на 12-14%.

7. Разработан способ установления зоны пластического утончения интенсивно нагруженных участков трубопроводов, резервуаров хранения метастабильных и криогенных жидкостей (в частности, нефти и газа). Данное исследование обеспечивает: достоверное и эффективное определение зон упругопластического деформирования стенок взаимодействующих систем при импульсных и гидродинамических нагружениях; учесть влияние процесса прохлопа пластин и оболочек на напряженное состояние конструкции.

8. Разработан механизм учета упругопластического деформирования пластин и оболочечных элементов конструкций. Исследование в данном направлении позволяют решать широкий круг задач нестационарной гидроупругопластичности и моделировать переходные процессы, происходящие в них.

9. Разработанные разностные алгоритмы и методики численного расчета служат основой расчета для случаев более сложного взаимодействия элементов конструкций с деформируемой средой. Исследование на основе принятых моделей кавитирующей и кипящей жидкости и численного расчета взаимодействия преграды с жидкостью позволяют проектировать различные конструкции, резервуары и трубопроводы, содержащие таких жидкостей.

10. Разработано программное обеспечение алгоритмов и методик с помощью которого: выполнены оценки сходимости и эффективности численных алгоритмов и сопоставлены решения тестовых задач; проанализировано влияние различных допущений на результаты расчетов; в двумерной постановке решен круг нелинейных практических задач.

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

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ABDIRASHIDOV ABLAKUL

**NON-STATIONARY INTERACTION NONLINEAR DEFORMABLE
ELEMENTS OF CONSTRUCTIONS WITH A LIQUID**

01.02.04 – Solid Mechanics

**DISSERTATION ABSTRACT OF DOCTOR SCIENCES (DSc)
ON PHYSICS AND MATHEMATICS SCIENCES**

Samarkand – 2018

The subject of doctor of sciences dissertation is registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan, number B2017.3.DSc/FM82.

The dissertation has been prepared the Tashkent State Technical University.

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

Scientific adviser:

Khudoynazarov Khayrulla

doctor of technical sciences, professor

Official opponents:

Mardonov Botir

doctor of physics-mathematics sciences, professor

Abdusattorov Abdusamad

doctor of physics-mathematics sciences, professor

Abirov Rustam Abdullayevich

doctor of physics-mathematics sciences, professor

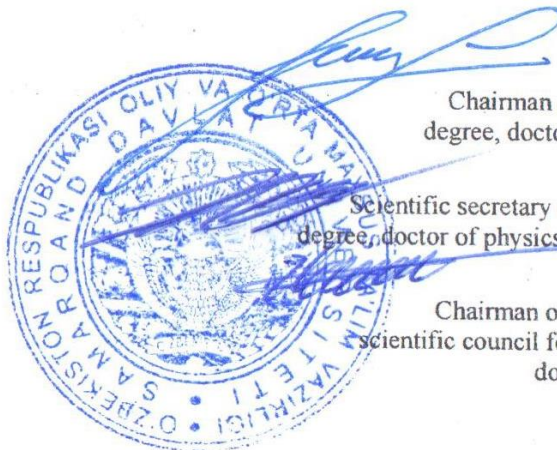
Leading organization:

Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers.

The defense will take place «21» January 2019 at 14:00 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: [sas_u_info@edu.uz](mailto:sasu_info@edu.uz)).

The thesis is available in the Information and Resource Center of Samarkand State University (registration number 78). (Address: 140104, Samarkand, University street, 15, Tel.: (8366) 2351938. Fax: (8366) 2351938.

Abstract of dissertation sent out on «21» December 2018 y.
(mailing report №1 on «21» December 2018 y.).



R.I.Khalmuradov

Chairman of scientific council for awarding degree, doctor of technical sciences, professor

B.Khuzhayorov

Scientific secretary of scientific council for awarding degree, doctor of physics-mathematics sciences, professor

K.Ismayilov

Chairman of scientific council seminar at the scientific council for the awarding academic degree, doctor of technical sciences, docent

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

The aim of the research is mathematical modeling and numerical solution of the problem of non-stationary interaction of elastoplastic deformable and destructible structural elements (shells, plates and slabs) with a liquid medium that changes its phase state in the process of deforming structures.

The object of study are single and coaxial cylindrical shells of finite and infinite length; smooth and stepped plates and slabs of infinite length; ordinary, bubbly, metastable and cryogenic liquids.

Scientific novelty of the research is as follows:

effective computational models have been developed for the interaction of elastoplastic deformable pipelines with metastable and cryogenic liquids under dynamic loads;

zones of plastic refinement of a certain part of pipelines (oil and gas), storage tanks for petroleum products and condensate were established based on solving a nonlinear wave problem of a hydroelastic system;

the numerical solution of the hydroelasticity problem (non-stationary interaction of the plate, liquid, and a rapidly expanding gas bubble) determines the occurrence of residual deflections of metal plates in the direction opposite to the load;

theoretically determined the existence of a boiling zone in metastable and cryogenic liquids in the process of non-linear deformation of the walls of the pipeline and hydraulic structures on the basis of a numerical solution of the problem of non-linear hydro-elastic-plasticity;

a numerical method for calculating the strength of underground and underwater pipelines based on the wave theory of hydroelasticity has been developed.

Implementation of the research results.

On the basis of the developed numerical methods and algorithms, as well as the results of the created programs for calculating non-stationary interaction of non-linearly deformable structural elements with a liquid:

the design methodology for improving the quality of the project for calculating the stress-strain state of gas pipes, efficient and reliable use of facilities was introduced at «Mubarekneftegaz» LLC at «Uzbekneftegaz» JSC (reference number 02/12-1-92 of May 7, 2018 of the JSC «Uzbekneftegaz»). As a result of studies of mathematical modeling of test and instrument-technological works, an algorithm for numerical calculation and software scientific and technical recommendations that predetermine the reliability of the gas pipeline system and the probability of system shutdown, reduced financial costs by 10-14%;

the methodology for the numerical calculation of the stress-strain state of a gas pipeline laid in sandy soil was introduced into the enterprise at JSC «Uzbekneftegaz», in particular, the design process in the departments of CS and IL of «Mubarekneftegaz» LLC (reference number 02/12-1-92 of May 7, 2018 of the JSC «Uzbekneftegaz»). As a result of the assessment, the stress-strain state of gas pipelines laid into sandy soil from a sandy environment with the definition of its possible subsidence, which ultimately led to savings of spending up to 10%.

the condition of the strength of the gas pipeline material was checked and the mathematical expression of the active voltage value at the point of the volume of gas pipelines was introduced in the process of technical calculation in the CS department and IL of «Muborakneftegaz» LLC (reference number 02/12-1-92 of May 7, 2018 of the JSC «Uzbekneftegaz»). As a result, the detection of plastic cracks in the pipes prevented the possibility of system failure and reduced the probability of system failure by 12-14%;

mathematical model, algorithm and program for calculating the nonlinear interaction of a gas pipeline with a deformable medium to determine the optimal level of laying a gas pipeline were put into practice when performing the technical task «Calculation of the stress-strain state of the «Dengizkul-MGPZ» gas pipeline» (reference number 02/12-1-92 of May 7, 2018 of the JSC «Uzbekneftegaz»). As a result, it was possible to reduce labor costs by 12-14%.

The outline of the thesis. The thesis consists of an introduction, 6 chapters, conclusion, referees and annexes. The volume of work is 193 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Худойназаров Х.Х., Абдирашидов А. Нестационарное взаимодействие упругопластически деформируемых элементов конструкций с жидкостью. Монография. - Ташкент: Фан, 2005. – 220 с.
2. Абдирашидов А., Абдурашидов А.А., Аминов Б.Б. Решения уравнения теплопроводности методом переменных направлений // Проблемы архитектуры и строительство, 2015, №1. - С.140-143. (05.00.00, №14).
3. Абдирашидов А., Абдурашидов А.А., Аминов Б.Б. Решения многомерных задач математической физики методом дробных шагов // Проблемы архитектуры и строительство, 2015, №2. - С.140-143. (05.00.00, №14).
4. Абдирашидов А., Абдурашидов А.А., Аминов Б.Б. Решение нелинейной краевой задачи для одномерного волнового уравнения с разностной схемой с весами // Проблемы архитектуры и строительство, 2016, №1. - С.140-143. (05.00.00, №14).
5. Худойназаров Х., Абдирашидов А., Деформирование пластины ступенчато-переменной толщины, подверженной действию взрывных волн // ToshTUMI axboroti, 2016, №4. (05.00.00, №11).
6. Абдирашидов А. Численное исследование нестационарного деформирования бесконечных соосных цилиндрических оболочек при гидродинамическом нагружении // Узбекский журнал "Проблемы механики", 2017, №1. - С.26-29. (01.00.00, №4).
7. Абдирашидов А. Нелинейное упругопластическое деформирование цилиндрической оболочки при импульсном нагружении // Узбекский журнал "Проблемы механики", 2017 г. №2. - С.26-29. (01.00.00, №4).
8. Худойназаров Х., Абдирашидов А. Нелинейное упругопластическое деформирование цилиндрической оболочки при гидродинамическом нагружении // Узбекский журнал "Проблемы механики", 2017 г. №2. - С.26-29. (01.00.00, №4).
9. Galiev Sh.U., Khudoynazarov Kh., Abdirashidov A., Abdurashidov A.A. Non-linear elastoplastic deformation of a hollow cylindrical shell of finite length under influence of internal pulse loading // ISJ Theoretical & Applied Science, USA. - 2018 - n°10 (66), - pp. 248-255. – doi: 10.15863/TAS ((№23) Scientific Journal Impact Factor, IF = 5,667).
10. Galiev Sh.U., Khudoynazarov Kh., Abdirashidov A., Abdurashidov A.A. Non-linear elastoplastic deformation of a hollow finite length cylindrical shell under hydrodynamic loading // ISJ Theoretical & Applied Science, USA. - 2018 - n°10 (66), - pp. 256-264. – doi: 10.15863/TAS ((№23) Scientific Journal Impact Factor, IF = 5,667).
11. Abdurashidov A.A., Ortiqov B.B., Qadirov N.X, Abdirashidov A. Exact solution of some nonlinear evolutionary equations using the modified simple equa-

tion method // ISJ Theoretical & Applied Science, USA. - 2018 - n°03 (59), - pp. 101-107. – doi: 10.15863/TAS ((№23) Scientific Journal Impact Factor, IF = 5,667).

II бўлим (II часть; II part)

12. Abdirashidov A., Karshiev A.B. Nonsteady Deformation of an Infinite Elastoplastic Plate by an Explosion in a Liquid // *Strength of Materials*. – 1989. – Vol. 21. – n° 6. – pp. 814-818.
13. Abdirashidov A., Karshiev A.B., Noraliyev N.Kh. Effect of deepening of a perturbation source in a plate on the parameters of a shock wave in a liquid // *International Applied Mechanics*. – 1993. – Vol. 29. – n°6. – pp. 459-461.
14. Абдирашидов А. Волновые процессы при подводном взрыве // Илмий тадқиқотлар ахборотномаси: Сб. науч. трудов СамГУ. - Самарканд, 2000. - №3. - С.34-39.
15. Абдирашидов А. Динамика импульсного деформирования трубы, содержащей пузырьковой жидкостью // VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: Тезисы докл., 23-29 августа 2001. – Пермь, 2001. - С. 83.
16. Абдирашидов А. Динамика взаимодействия оболочечных элементов конструкций с пузырьковой жидкостью // Технические науки и глобальные проблемы XXI века: Материалы Респ. науч.-прак. конф. 2-3 октября 2001. – Ташкент, 2001. - С.98-99.
17. Абдирашидов А. Волны напряжений в телах вращения // *Differen. Equat.: Abstracts of reports Intern. Conf.* 24-26 September 2003. –Almaty, 2003. - P.71.
18. Абдирашидов А. Об одной модели пузырьковой жидкости // *Samarqand davlat universiteti ilmiy tadqiqotlar axborotnomasi*, 2003. - №1. - С.7-11.
19. Абдирашидов А., Худойназаров Х. Упругопластическое деформирование стенок резервуара // *Узбекский журнал "Проблемы механики"*, 2003, №2. - С.41-44.
20. Абдирашидов А. Исследование влияния воздействия гидроударной волны в жидкости на деформирование эластичного покрытия // Актуальные проблемы государственно-правового строительства Республики Казахстан: Материалы Международной научно-теоретической конференции, посвященной 10-летию КазГЮУ, Шымкент, 2004. Ч.2. - С.131-132.
21. Абдирашидов А. Математическое моделирование нелинейных поверхностных волн в слоях осадочных пород // Инфокоммуникационные и вычислительные технологии в науке, технике и образовании: Материалы Междунар. науч. конф. 28-30 сентября 2004. - Ташкент, 2004. – С.146-150.
22. Абдирашидов А. Нелинейные поверхностные волны в слоях осадочных пород // Проблемы механики и сейсמודинамики сооружений: Материалы Междунар. науч. конф. 27-28 мая 2004. – Ташкент, 2004. - С.208-210.
23. Абдирашидов А. Elastoplastic deformation of reservoir walls // Современные проблемы механики машин и актуальные проблемы развития наземных

- транспортных систем: Материалы Республ. Науч.-техн. конф. с участием зарубежных ученых. 7-8 октября 2004. – Ташкент, 2004. – С.228-230.
24. Абдирашидов А. Поверхностные волны в осадочных породах // Актуальные проблемы современной науки-техники и технологии: Материалы Респ. науч. конф. 14-15 мая 2004. - Джизах, 2004. - С.78-81.
25. Абдирашидов А. Исследование влияния воздействия гидроударной волны в жидкости на деформирование резинового покрытия // Проблемы архитектуры и строительство, 2004, №1. - С.15-17.
26. Абдирашидов А., Худойназаров Х.Х. Программа расчета динамики деформирования соосных цилиндрических оболочек бесконечной длины, взаимодействующих через деформируемую среду // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство № DGU 00893. 25.01.2005.
27. Абдирашидов А., Худойназаров Х.Х. Программа расчета импульсного деформирования соосных цилиндрических оболочек бесконечной длины, взаимодействующих через жидкость // Государственное патентное ведомство РУз. Свидетельство № DGU 00894. 25.01.2005 г.
28. Абдирашидов А., Бабаяров А. Исследование распространение поверхностных волн в долине // Проблемы архитектуры и строительство, 2008, №1. - С.15-17.
29. Абдирашидов А. Численное исследование нестационарного взаимодействия упругопластически деформируемой цилиндрической оболочки конечной длины с деформируемой жидкой средой // Естественные и математические науки в современном мире: Сб. ст. по матер. LI междунар. науч.-прак. конф. № 2(49). – Новосибирск: СибАК, 8 февраля 2017 г.
30. Абдирашидов А., Ортиков Б.Б., Кадиров Н.Х., Абдурашидов А.А. Применение метода вариационных итераций к приближенному решению некоторых краевых задач гидродинамики // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы математики и информатики: теория, методика, практика», Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина (Москва, Россия), 19-21 апреля 2018 г.

Автореферат Самарқанд давлат университетининг
“СамДУ илмий тадқиқотлар ахборотномаси” журнали таҳририятида
таҳрирдан ўтказилди (19.12.2018 йил).

Гувоҳнома №10-3512

Босишга рухсат этилди 19.12.2018.
Шартли босма табағи 3,6. Қоғоз бичими 60х84_{1/16}.
“Times” гарнитураси. Адади 100 нусха. Буюртма №20/12.

СамДЧИ нашр-матбаа маркази босмахонасида чоп этилди.
Манзил: 140104, Самарқанд ш., Бўстонсарой кўчаси, 93