

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

---

**УРГАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ШУКУРОВ ЗОХИД КУЧКАРОВИЧ**

**ТРУБОПРОВОДЛАРДА ЭЛАСТИК ЁПИШҚОҚ СУЮҚЛИКЛАРНИНГ  
НОСТАЦИОНАР ВА ПУЛЬСАЦИЯЛИ ОҚИМЛАРИ**

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА  
ДОКТОРИ (PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Урганч – 2021

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

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

**Contents of Dissertation Abstract of the Doctor of Philosophy (PhD) on  
Physico-mathematical Sciences**

**Шукуров Зоҳид Кучкарович**

Трубопроводларда эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ностационар ва  
пульсацияли оқимлари ..... 5

**Шукуров Зоҳид Кучкарович**

Нестационарные и пульсирующие течения упруговязких жидкостей в  
трубопроводах ..... 21

**Shukurov Zoxid Kuchkarovich**

Nonstationary and pulsating flows of viscoelastic liquids in pipelines ..... 39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ

List of published works ..... 43

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

---

**УРГАНЧ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ШУКУРОВ ЗОХИД КУЧКАРОВИЧ**

**ТРУБОПРОВОДЛАРДА ЭЛАСТИК ЁПИШҚОҚ СУЮҚЛИКЛАРНИНГ  
НОСТАЦИОНАР ВА ПУЛЬСАЦИЯЛИ ОҚИМЛАРИ**

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА  
ДОКТОРИ (PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Урганч – 2021

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.1.PhD/FM174 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Урганч Давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида ([www.instmech.uz](http://www.instmech.uz)) ва "Ziyonet" ахборот таълим порталида ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Наврузов Куралбай**

физика-математика фанлари доктори,  
профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Бозоров Дилшод Раимович**

техника фанлари доктори, профессор

**Маткаримов Санъат Юсубович**

физика-математика фанлари номзоди,  
доцент

**Етакчи ташкилот:**

**Ирригация ва сув муаммолари илмий  
тадқиқот институти**

Диссертация ҳимояси Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти ҳузуридаги фан доктори илмий даражасини берувчи DSc.02/30.12.2019. Т/FM.61.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «14» «июль» соат 10<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100125, Тошкент, Дўрмон йўли кўчаси, 33, 1-мажлислар зали. Тел: (99871) 262-71-52; Факс: (99871) 262-71-32, e-mail: [instmech@academy.uz](mailto:instmech@academy.uz)).

Диссертация билан Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (7- рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент ш., Дўрмон йули кўчаси, 33-уй. Тел.: (99871) 262-71-52).

Диссертация автореферати 2021 йил «28» июнь куни тарқатилди.  
(2021 йил «28» июндаги 3 рақамли реестр баённомаси)

**М.М.Мирсаидов**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш  
раиси, т.ф.д., профессор, ЎЗР ФА академиги

**М.К.Усаров**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш  
илмий котиби, т.ф.д., к.и.х

**З.М.Маликов**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш  
қошидаги Илмий семинар раиси, т.ф.д., к.и.х.

## **КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)**

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда суюқликлар ва газлардан унумли фойдаланиш, жумладан, иқтисодийнинг нефть соҳасида (нефть ва нефть маҳсулотларини қувурларда узатиш), кимё, озиқ-овқат соҳаларида (транспортёрлар, пневматик конвейерларга тааллуқли масалаларни қарашда), тўқимачилик ва пахта тозалаш саноатларида (пахта хомашёсини тозалашда, технологик ускуналарни лойиҳалаш ва ишончилигини таҳлил этишда, синтетик материалларни олишда), гидротехникада (қувурларни қуйқалардан тозалашда, қаттиқ заррачаларни узатишда) муҳим масалалардан бири бўлиб келмоқда. Шу жихатдан суюқликлар ва газларнинг ностационар ва пульсацияли оқимларидаги муайян шароитларда тебраниш ёки пульсация ёрдамида эритиш, қуритиш, тозалаш ва бошқа жараёнларини тезлаштириш ва яхшилаш имкони мавжудлигига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада, жумладан, АҚШ, Буюк Британия, Нидерландия, Германия, Бельгия, Хитой, Жанубий Корея, Россия, Ўзбекистон ва бошқа ривожланган мамлакатларда суюқликлар ва газларнинг конвектив кўчиш жараёнларини назарий ҳамда амалий жихатдан тадқиқ қилиш алоҳида аҳамиятга эга.

Жаҳонда суюқлик оқимида релаксацияни ҳисобга олган ёки олмаган ҳолда ноньютон суюқликларининг чизиқсиз модели билан ифодалашга йўналтирилган мақсадли илмий тадқиқот ишлари олиб боришга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Ушбу суюқликлар сирасига полимерли эритмалар, суспензиялар, лойқали эритмалар, мойли бўёқлар, кондитер, фармацевтика ва озиқ-овқат маҳсулотлари, ракета ёқилғиси, қурилиш ва бурғулаш эритмалари, суюқ композит материаллар, шунингдек физиологик суюқликлар – қон, сўлак ва бошқалар киради. Шу билан бирга суюқликларнинг оқимларини, уларнинг реологик хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда, цилиндрик ва ясси қувурларда ноньютон суюқлик оқими сифатида математик моделлаштиришга алоҳида эътибор берилмоқда.

Республикамизда синтетик толалардан фойдаланиш, композит материаллардан тайёрланган эластик қувурлар ёрдамида ер остидан, ер устидан экинларни суғориш, томчилатиб суғориш, эгатлаб суғориш усулларини такомиллаштириш, турли технологик жараёнларга талабларнинг ортиши, масалан, қудуқларни бурғулашда суюқликнинг зарурий реологик хусусиятларини таъминлаш, парчаланган маъданни ҳалқали қувурлар ёрдамида олиб чиқишнинг самарадорлигини яхшилашга доир чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. Насос станцияларининг агрегат қурилмаларида суюқликлар ўз таркибини ўзгартириши натижасида ишчи системалари ишдан чиқиши кузатилмоқда. Ушбу нохуш ҳолатлар рўй беришининг асосий сабаби суюқликнинг ҳарорат, босим ёки бошқа омиллар таъсирида ўз хусусиятларини ўзгартириши ҳисобланади. 2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида,

жумладан, «юқори технологияли қайта ишлаш тармоқларини, энг аввало, маҳаллий хомашё ресурсларини чуқур қайта ишлаш асосида юқори кўшимча қийматли тайёр маҳсулот ишлаб чиқаришни жадал ривожлантиришга қаратилган саноатни янада модернизация ва диверсификация қилиш, иқтисодиётда энергия ва ресурслар сарфини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий этиш»<sup>1</sup> вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан, ясси канал ва цилиндрлик кувурларда ноньютон суюқликлари оқимларининг жараёнларини тадқиқ қилишда илмий тадқиқот ишларини олиб бориш муҳим илмий аҳамиятга эга ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2008 йил 15 июлдаги ПҚ-916-сон «Инновацион лойиҳалар ва технологияларни ишлаб чиқаришга татбиқ этишни рағбатлантириш борасидаги кўшимча чора-тадбирлар тўғрисида», 2017 йил 30 июндаги ПҚ-3107-сонли «Нефть ва газ саноатини бошқариш тизимини такомиллаштириш тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация иши муайян даражада хизмат қилади.

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

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Ҳозирги вақтда қолдиқ деформацияли суюқликларнинг математик моделини куриш, ҳисоблаш алгоритмларини тузиш ва такомиллаштириш бўйича илмий тадқиқот ишлари дунё миқёсидаги етакчи илмий марказлар ва олий таълим муассасаларида, жумладан, NASA (National Aeronautics and Space Administration), Stanford University (АҚШ), Санкт-Петербург Давлат техника университети, Марказий аэрогидродинамика институти (РФ), China Aerodynamics Research and Development Center (ХХР), The Air Systems Research Center (Япония), Cambridge University (Буюк Британия), Computational Aerodynamics Institute (Канада)да олиб борилмоқда ва катта натижаларга эришилган.

Ушбу йўналишда бир қатор муаллифлар томонидан, жумладан, Дж.Астарита, Дж.Марруччи, З.П. Шульман, Б.М.Хусид ишларида умумий ҳолда Коши ва Фингер чекли деформациялари тензори орқали кучланиш тензорини ифодалаш ёрдамида ҳолат реологик тенгламалари ўрганилган. Ж.Ф.Файзуллаев, Қ.Наврўзовларнинг илмий тадқиқот ишларида хотирали суюқликлар ҳолатининг чизиксиз реологик ҳолати тенгламалари Максвелл модели кўринишида умумлаштирилган. Ушбу келтирилган ишларда суюқликнинг мураккаб реологик интеграл типига ҳолат тенгламалари,

---

<sup>1</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони.

дифференциал типда берилган ҳолат тенгламаларига эквивалентлигидан ҳамда эластик ёпишқоқ суюқликларнинг дифференциал типдаги ҳолат тенгламаларидан фойдаланиб, конкрет қўйилган амалий масалаларни ечишда қулайликларга эга эканлиги кўрсатилган.

Дунё олимлари У.Л.Улкинсон, К.Трусделл, Р.П.Чобра, Дж.Ф.Ричардсон, П.М.Огибалов, А.Х.Мирзаджанзаде ва бошқаларнинг илмий тадқиқот ишларида ясси канал ва цилиндрик қувурларда Ньютон ва ноньютон суюқликларнинг ностационар ва пульсацияли ламинар ва турбулент оқимлари ўрганилган.

Республикамиз олимлари жумладан, Ж.Ф.Файзуллаев, Ж.А. Акилов, Б.Х.Хўжаёров, К.Ш.Латипов, О.И.Умаров, Қ.Наврўзов, З.М.Маликов, И.Қ.Хужаев, С.И.Худайкулов, Д.Р.Базаров ва бошқалар томонидан Эластик ёпишқоқ суюқликларнинг канал ва қувурларда ностационар ва пульсацияли оқимлари, уларнинг мураккаб реологик моделларини қўллаш орқали конкрет амалий масалаларни ечиш, таҳлил усулларини ишлаб чиқиш бўйича илмий тадқиқот ишлари олиб борилган ва ижобий натижаларга эришилган.

Ноньютон суюқликлар ҳаракатини ўрганишда кўплаб тадқиқотлар олиб борилганига қарамай, ҳозирги кунда Шулман-Хусид модели ёрдамида масалалар етарли даражада тадқиқ қилинмаган ва амалиётга тадбиқ этилмаган. Жумладан, эластик ёпишқоқ суюқликларнинг оқимида, босим градиентининг кескин ўсиши ва кескин камайиб нолга тенг бўлишидаги ностационар оқимларида содир бўладиган гидродинамик ўзгаришлар батафсил ўрганилмаган. Эластик ёпишқоқ суюқликларнинг пульсацияли ва осцилляцияли оқимларида гидравлик қаршилиқнинг тебраниш частотаси параметрига боғлиқ равишда ўзгариш қонуниятлари, Ньютон ва бошқа суюқлик оқимлари ўзгариши қонуниятларидан фарқи амалий масалаларни ечиш орқали аниқланмаган ва унинг афзалликлари кўрсатилмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Урганч Давлат университети “Амалий математика” кафедраси илмий тадқиқотлар режасига мос ҳолда ОТ-Ф4-04(05) “Материал ночизиқли эволюцион тенгламаларини ечишнинг спектрал усулини қўллаш. Юрак томир системаси биомеханикаси” (2017–2020 йй.) мавзудаги илмий тадқиқот лойиҳаси доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** эластик ёпишқоқ суюқликлар реологик моделларини Шулман-Хусид модели модификацияси шаклида такомиллаштириш, ушбу моделнинг Ньютон, Максвелл моделларидан афзалликларини асослаш, ясси канал ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ностационар ҳамда пульсацияли оқими масалаларини тадқиқ этишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

модификацияланган модель асосида ясси канал ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ностационар, пульсацияли оқимларининг янги масалаларини уларга мос бўлган бошланғич ҳамда чегаравий шартлар асосида шакллантириш;

эластик ёпишқоқ суюқликнинг ўққа нисбатан симметрик бўлган ностационар ва пульсацияли оқимлари масалаларининг ечимларини аналитик усулда олиш ва таҳлил қилиш;

ясси канал ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликнинг ностационар, пульсацияли оқимларида суюқлик тезликлари тақсимланиши ҳамда суюқлик сарфининг ўзгариши қонуниятларини аниқлаш, уларнинг Ньютон модели асосида аниқланган қонуниятлардан фарқи ва афзалликларини кўрсатиш;

ясси канал ва цилиндрик қувурларда юқори юкланишлар пайдо бўлишининг асосий сабабларини ташкил этувчи ностационар оқимларда суюқлик сарфининг кескин ошиши, тўхтовчи оқимларда суюқлик сарфининг кескин камайиши ва қарши оқимнинг пайдо бўлиши қонуниятларини аниқлаш;

эластик ёпишқоқ суюқликлар пульсацияли ва осцилляцияли оқимларида гидравлик қаршиликнинг тебраниш частотаси параметрига боғлиқ равишда ўзгариши қонунларининг Ньютон суюқлик моделидаги оқим қонуниятлари билан солиштириш орқали янги гидродинамик қонуниятларни яратишдан иборат.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида ясси каналларда ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликнинг ностационар, пульсацияли ва осцилляцияли оқимлари олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** оддий ясси каналларда ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ностационар, пульсацияли ва осцилляцияли оқимларининг математик моделларини тадқиқ қилишдан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари** ясси каналларда ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ сиқилмайдиган суюқликнинг ностационар, пульсацияли ҳамда осцилляцияли оқимлари масалаларини ечишда Лаплас-Карсон алмаштиришлари қўлланилган. Тебранувчан оқимлар масалаларини ечишда математик физика тенгламаларини ечиш усулларида фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

умумлашган реологик моделлар асосида эластик ёпишқоқ суюқлик ҳаракатининг асосий дифференциал тенгламалари шакллантирилган ва қувур орқали узатиш масалаларини ечишнинг соддалаштирилган вариантлари таклиф этилган;

эластик ёпишқоқ суюқликнинг ясси канал ва цилиндрик қувурларда ностационар, пульсацияли ва осцилляцияли ҳаракати масалаларини ечиш усуллари такомиллаштирилган;

қўйилган масалаларнинг янги ечимлари таҳлили натижасида эластик ёпишқоқ суюқлик параметрларининг интерваллари аниқланган;

ноньютон суюқликлар оқимларининг “эластик кўтарилиш” ва “эластик қайтиш” жараёнларининг янги гидродинамик қонуниятлари аниқланган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

ясси канал ва цилиндрик қувурлардаги эластик ёпишқоқ суюқликнинг ностационар, пульсацияли ва осцилляцияли оқимлари масалаларини

ечишнинг таклиф этилган усуллари, насос қурилмасини ишга тушириш ҳамда тўхтатишда механизмларнинг ишдан чиқишининг асосий сабабчиси бўлган резонанс ҳодисасининг пайдо бўлишини аниқлаш имконини беради;

ясси канал ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликнинг пульсацияли оқимида гидравлик қаршиликнинг камайиш интервали олинган натижалар орқали аниқланган;

эластик ёпишқоқ суюқликнинг пульсацияли оқими масаласи ясси канал ва цилиндрик қувурларда чўкинди, қуйқа ҳамда бошқа тикилмаларни тозалашда катта самара бериши аниқланди.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.** Изланишлар замонавий услуб ва воситалардан фойдаланилган ҳолда ўтказилганлиги, тадқиқотларнинг назарий ва амалий механика қоидалари асосида амалга оширилганлиги, назарий ва тажриба тадқиқотлари натижаларининг ўзаро мослиги, натижаларни амалиётга жорий қилинганлиги ҳамда илмий адабиётларда мавжуд бўлган масалаларнинг назарий олинган сонли қийматлари билан мос келиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқотнинг илмий аҳамияти умумлашган реологик моделлар асосида эластик ёпишқоқ суюқлик ҳаракатининг асосий дифференциал тенгламалари шакллантирилди, ясси канал ва цилиндрик қувурларда ностационар, пульсацияли ва осцилляцияли оқимлар масалаларини ечиш усуллари такомиллаштирилди, янги ечимлар таҳлили натижасида “эластик кўтарилиш” ҳамда “эластик қайтиш” жараёнларининг гидродинамик қонуниятларини аниқлаш имкониятлари билан изоҳланади.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти ясси канал ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликнинг ностационар, пульсацияли ва осцилляцияли оқимлари масалаларини ечишда резонанс ҳодисаси, гидравлик қаршиликнинг камайиш оралиғи ва чўкинди, қуйқа ҳамда бошқа тикилмаларни тозалаш каби жиҳатларни баҳолаш имконияти яратилгани билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ясси канал ва цилиндрик қувурларда ностационар ва пульсацияли ҳаракатларини тадқиқ этиш асосида:

қон хусусиятларининг эластик ёпишқоқ суюқликларга яқинлиги эътиборга олиниб, бу турдаги суюқликларнинг қувурдаги пульсацияли ҳаракати, артериал томирларда қоннинг пулсли ҳаракатини моделлаштиришда ва унга мос масалаларни ечишда Ф-4-42 рақамли “Юрак биомеханикаси ва унинг татбиқлари” мавзусидаги фундаментал лойиҳасида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 29 апрель 2019 йил 89-03-1661 сонли маълумотномаси ва Ўзбекистон Республикаси Соғлиқни сақлаш вазирлиги Республика шошилинич тиббий ёрдам илмий маркази Хоразм ва Самарқанд вилоятлари филиалларининг маълумотномалари). Натижада артериал тизимни математик моделлаштиришга доир дастурий восита ёрдамида олинган пульс тўлқинларининг тарқалиши ва сўниши қонуниятлари асосида артериал томирлардаги гидравлик қаршиликларни аниқлаш имконини берган;

натижалар Ўзбекистон Республикаси Уй-жой коммунал хизмат кўрсатиш вазирлиги Самарқанд вилоят уй-жой коммунал хизмат кўрсатиш бошқармаси Самарқанд вилоят “Сувоқова” давлат унитар корхонаси томонидан сув узатишни ёки оқова сувларни ҳайдашни таъминлайдиган насос станцияларидан самарали фойдаланишда жорий этилган (диссертациянинг иловаларида келтирилган). Самарқанд вилоят “Зарафшон ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси” ва Урганч вилоят “Чапқирғок Амударё ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси” томонидан сувни худудларга етказиб бериш ва суғориладиган ерларда сувларни қувурлар орқали тақсимлашни бошқаришда жорий этилган (диссертациянинг иловаларида келтирилган). Натижада оқова сувларни ноньютон суюқликлар деб қараб, насос станцияларида насос қурилмаларини ишга тушириш ва тўхтатиш жараёнларида тебранишларни сўндириш натижасида насос механизмларининг иш самарадорлигини баҳолаш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари 2 та халқаро илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича 10 та илмий иш чоп этилган бўлиб, жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа фанлари докторлик диссертациялари (PhD) асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 8 та мақола (4 таси республика, 3 таси хорижий ва 1 таси Scopus базаси рўйхатига кирувчи хорижий журналларда) нашр этилган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация кириш қисми, учта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва илова қисмларидан ташкил топган. Диссертациянинг ҳажми 124 бетни ташкил қилади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг республика фани ва технологиялари тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари белгилаб олинган ҳамда тадқиқот объекти ва предмети аниқланган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, ишнинг янгиликлари, назарий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этилганлик ҳолати ҳамда нашр этилган ишлар ва диссертация ишининг тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг “**Эластик ёпишқоқ суюқликларнинг реологик моделлари ва ҳаракат дифференциал тенгламалари**” деб номланган биринчи бобида эластик ёпишқоқ суюқликларнинг реологик моделлари ва ҳаракат дифференциал тенгламалари келтирилган. Кичик деформациялар ва секин оқимлар учун ортогонал Декарт ва цилиндрик координаталар системаларида юқориги ва пастки конвектив ҳосилалар оддий ҳосилаларга айланади. Буларни эътиборга олган ҳолда Шульман-Хусид модели ушбу кўринишдаги модификацияланган модель шаклига келтирилган:

Декарт координаталар системаси учун ушбу кўринишда:

$$T = \sum_{k=1}^{\infty} T_k, \quad \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial t} + T_k = 2\eta_k D, \quad D = \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (1)$$

цилиндрик координаталар системаси учун эса ушбу кўринишда:

$$T = \sum_{k=1}^{\infty} T_k, \quad \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial t} + T_k = 2\eta_k D, \quad D = \frac{1}{2} \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r}. \quad (2)$$

бу ерда  $\lambda_k = \frac{\lambda}{k^\alpha}$ ,  $\eta_k = \frac{\eta}{\xi(\alpha)k^\alpha}$  кўринишида олинган бўлиб,  $\eta$  – бошланғич

ҳолатдаги Ньютон суюқлигининг динамик ёпишқоқлик коэффиценти;  $\lambda$  – релаксация коэффиценти (вақти);  $\alpha$  – релаксация вақт спектрининг тақсимланишини характерловчи сон;  $\xi(\alpha)$  – Риманнинг дзета функцияси, у

$\xi(\alpha) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^\alpha}$  кўринишидаги ифода орқали аниқланади.

Бу келтирилган модификацияланган Шульман-Хусид моделидан хусусий ҳолда Ньютон, Максвелл моделлари келиб чиқиши кўрсатилган. Релаксация коэффиценти  $\lambda$  нолга интилган ҳолатида хусусий ҳолда Ньютон модели келиб чиқади. Ҳақиқатдан ҳам, (1) ва (2) тенгламаларда  $\lim_{\lambda \rightarrow 0} \lambda_k = 0$  десак, Декарт координаталар системаси учун  $T = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$  ва цилиндрик

координаталар системаси учун  $T = \eta \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r}$  кўринишдаги тенгламани ҳосил қилиш қийин эмас. Бу формулалар эса Ньютон моделига таллуқлидир.

Маълумки, Ньютон модели суюқликнинг эластиклик хусусиятини ёки релаксация таъсирини ўз ичига олмайди. Шу сабабдан ҳам бу модель ёпишқоқ суюқлик модели деб юритилади. Ньютон моделининг камчилиги – суюқликнинг эластиклик хусусиятини эътиборга олмаслигида, афсуски эластиклик хусусиятини намоён этувчи суюқликлар техника ва технологик жараёнларда жуда кўплаб учрайди.

Модификацияланган Шульман-Хусид моделининг хусусий холи сифатида релаксация вақти спектрининг тақсимланишини характерловчи сон  $\alpha$  чексизликка интилганда хусусий ҳол сифатида Максвелл суюқлиги учун реологик тенглама ҳосил бўлади. Яъни, (1) тенгламада  $\alpha \rightarrow \infty$  бўлганда, Декарт координаталар системасида  $\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$  тенгламани ва цилиндрик

координаталар системасида  $\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r}$  тенгламани ҳосил қиламиз. Бу тенгламалар Максвелл моделини ифода қилишади.

Келтирилган Максвелл моделининг Шульман-Хусид моделига нисбатан камчилиги шундан иборатки, бу ерда эластик ёпишқоқ суюқлик бир жинсли суюқликдан иборат деб, фақат битта релаксация вақти (коэффиценти) орқали аниқланади. Шульман-Хусид моделининг модификациясида эса эластик ёпишқоқ суюқлик бир жинсли эмас деб қаралади ва релаксация вақти (коэффиценти) чексиз кўп яқинлашувчи кетма-кетлик сифатида ифодаланиб, булар ичидаги энг катта релаксация коэффиценти танланади,

ундан кейинги релаксация коэффициентлари эса унинг маълум бир қонуниятига бўйсинувчи улуши сифатида аниқланади. Шу боисдан ҳам Шульман-Хусид моделининг модификацияси Максвелл моделининг умумлашмаси сифатида қаралади.

Бу бобда, шунингдек, эластик ёпишқоқ суюқлик ҳаракатининг кучланишлар симметрик тензори, икки ва уч ўлчовли Декарт ва цилиндрик координаталардаги дифференциал тенгламалари келтириб чиқарилган. Эластик ёпишқоқ суюқликнинг ясси канал ва цилиндрик қувурдаги ҳаракати тенгламаларини чизиклаштириш орқали масалани соддалаштириш методикаси берилган. Бунинг учун фараз қилиндики, оқим ўққа нисбатан симметрик; канал эни  $h$  (ёки қувур радиуси  $R$ ) қувур узунлиги  $L$  дан анча кичик:  $\frac{h}{L} = \frac{R}{L} \ll 1$ , кўндаланг тезлик эса бўйлама ўртача тезлик  $U$  дан анча кичик. Бу фаразларни ҳисобга олиб,  $t = \lambda t_1$ ,  $y = h y_1$ ,  $x = L x_1$ ,  $u = U u_1$ ,  $\vartheta = V \vartheta_1$ ,  $p = \frac{\eta U L}{h^2} p_1$ ,  $\tau_{ij} = \eta \frac{U}{h} \tau_{1,ij}$ ,  $\lambda_k = \lambda \lambda_{1,k}$ ,  $\eta_k = \eta \eta_{1,k}$  шакл алмаштиришлар орқали ўлчовсиз кўринишга келтирилган тенгламаларнинг ҳадлари баҳоланган.

“Кучланишлар” орқали ифодаланган суюқликнинг ҳаракат тенгламалари системаси ва симметрияни ҳисобга олиб тузилган реологик тенгламалардаги кичик ҳадларни ташлаб юбориш натижасида қуйидаги тенгламалар системаси ҳосил қилинган:

Декарт координаталарида:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \tau = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_k, \quad \lambda_k \frac{\partial \tau_k}{\partial t} + \tau_k = \eta_k \frac{\partial u}{\partial y}; \quad (3)$$

цилиндрик координаталарда:

$$\rho \frac{\partial \vartheta_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rx}), \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \tau_{rx} = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_{k,rx}, \quad \lambda_k \frac{\partial \tau_{k,rx}}{\partial t} + \tau_{k,rx} = \eta_k \frac{\partial \vartheta_x}{\partial r}. \quad (4)$$

Ясси канал ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликнинг ностационар ва пульсацияли оқимлари ҳақидаги масалаларнинг математик кўйилишини тугаллаш учун бошланғич ва чегаравий шартлар шакллантирилган.

Суюқлик бошланғич ҳолатда ҳаракатланмайди, яъни тинч ҳолатни сақлайди.  $t > 0$  вақтдан бошлаб нолдан фарқли ўзгармас босим градиенти таъсирида суюқлик ҳаракатга келади деб қаралаган. Бу жараён эластик ёпишқоқ суюқликнинг ясси каналдаги ностационар ҳаракати сифатида шакллантирилган. Бундан ташқари, қувур ва каналнинг кириш ва чиқиш кесимларида бир хил кўринишда тебранадиған босим ўзгаришларини комплекс функциялар шаклида ифодалаш мумкинлигидан фойдаланиб, чегаравий шартлар киритилган.

Ясси каналларда ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқлик оқимини ифодаловчи тенгламалар системасининг тўлиқ чизиклаштирилган шакли олинган ва унинг кичик амплитудали тебранишлар учун аналитик ечимини олиш имкониятлари яратилган.

Диссертациянинг “**Ясси канал ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликнинг ностационар оқимлари**” деб номланган иккинчи бобида эластик ёпишқоқ суюқликнинг ҳаракатга келиш жараёни масаласини шакллантиришда эластик ёпишқоқ суюқлик  $t=0$  вақтгача тинч ҳолатда деб ҳисобланади ва  $t=0$  вақтдан бошлаб нолдан фарқли ўзгармас босим градиенти таъсирида ҳаракатга келади. Бу жараён эластик ёпишқоқ суюқликнинг ясси каналдаги ностационар ҳаракати сифатида шакллантирилган. Бунда ясси канал деворлари орасидаги масофа  $2h$  деб белгиланди, канал етарлича узун, деб фараз қилиниб, эластик ёпишқоқ суюқлик оқими учун характерли нисбий узунлик танланди. Бунда канал эни унинг узунлигига нисбатан жуда кичик деб ҳисобланди, шунинг учун оқимларда вертикал ўқ бўйича тезликлар пайдо бўлмайди. Бундай ҳолларда суюқликнинг ясси каналлардаги ҳаракати унинг реологик хоссаларини ҳисобга олган ҳолда, биринчи бобда шакллантирилган соддалаштирилган (3) тенгламалар системаси билан ифодаланади.

Ҳосил қилинган (3) тенгламалар системасини ечиш учун бошланғич ва чегаравий шартлар юқорида келтирилганидек,  $t=0$  вақтгача суюқлик тинч ҳолатда деб ҳисобланган. Вақтнинг нолдан фарқли қийматларида ўзгармас босим градиенти таъсирида каналда суюқлик ҳаракатга келади деб қаралган. Каналнинг деворида суюқлик тезлиги ва ўқда бўйлама тезликдан олинган ҳосила нолга тенг деб олинган. Қаралаётган оқим секин содир бўлаётганлиги туфайли (3) тенгламалар системасини аналитик шаклда ечиш учун бошланғич ва чегаравий шартларни эътиборга олиб, Лаплас-Карсон алмаштириши қўлланилган ва эластик ёпишқоқ суюқлик ҳаракатида бўйлама тезлик тақсимланишини аниқловчи формулалар олинган. Бу мураккаб формулалар асосида сонли ҳисоб юритишни соддалаштириш учун Шульман-Хусид моделининг асимптотик қийматларидаги эластик ёпишқоқ суюқликнинг ностационар ҳолатдан стационар ҳолатга ўтиш жараёни тадқиқ қилинган. Бунда Шульман-Хусид модели учун ўлчамсиз шаклдаги эластиклик динамик ёпишқоқлик коэффициенти қуйидаги кўринишда олинган:

$$\bar{\eta}(\bar{s}) = \frac{1}{\xi(\alpha)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(k^\alpha - EL\bar{s})}. \quad (5)$$

Бу ифоданинг иккита лимитик ҳолатидан фойдаланилди. Яъни,  $t \gg \lambda$  бўлганда  $|ELs| \ll 1$  бўлиб, бунга мос бўлган ечим Ньютон суюқлигининг ностационар ҳолатдан стационар ҳолатга ўтиш жараёнини ифода қилади.  $t \ll \lambda$  бўлган ҳолда эса  $|\lambda s| \gg 1$  бўлиши ҳоли алоҳида текширилган. Бу ерда  $|\lambda s| \gg 1$  шарт бажарилганда (5) ифода қуйидаги асимптотик шаклга келтирилган

$$\bar{\eta}(s) = \pi / \xi(\alpha) \alpha \sin \frac{\pi}{\alpha} (\lambda s)^{1-\frac{1}{\alpha}}. \quad (6)$$

Топилган (6) ифодани трансцендент тенглама  $\frac{ih}{\sqrt{\nu}} \sqrt{\frac{s}{\bar{\eta}(s)}} = \frac{(2n+1)}{2} \pi$  га

кўйиб унинг ечими топилади. Топилган ечимдан фойдаланиб ясси каналда эластик ёпишқоқ суюқликнинг ностационар ҳолат учун бўйлама тезлик учун ифода олинган:

$$\frac{u(0,t)}{u_{0\max}} = 1 - 32 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\sqrt[3]{\xi^2(2)EL}}{3\sqrt[3]{(2n+1)^7 \pi^3}} (\cos A\sqrt{3}t - \sqrt{3} \sin A\sqrt{3}t) e^{-\frac{v}{h^2}At}. \quad (7)$$

бу ерда:  $A = \frac{\sqrt[3]{(2n+1)^4 \pi^2}}{8\sqrt[3]{\xi^2(2)EL}}.$

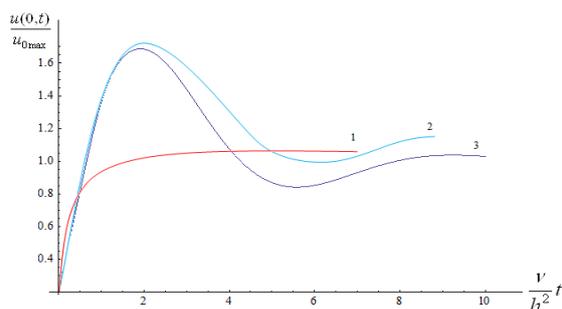
Топилган (7) ечим орқали Ньютон суюқлиги ва эластик ёпишқоқ суюқликнинг ўзгармас босим градиенти таъсири остида ностационар ҳолатдан стационар ҳолатга ўтиши жараёни тадқиқ қилинган.

Ньютон суюқлигидаги жараён релаксация коэффициентининг нолга тенг қиймати орқали топилади, яъни:  $\bar{\eta}_k(s) = \eta \eta_k^*(s) = \eta$ . Демак бу ҳолда трансцендент тенглама ечими қуйидагича аниқланади:  $\bar{s} = \frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2$ . Ушбу тенгликни эътиборга олган ҳолда қуйидагича ечим топилган:

$$\frac{u(0,t)}{u_{0\max}} = 1 + 32 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3 \pi^3} \cos\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{y}{h}\right) e^{-\frac{v}{h^2} \bar{s} t}. \quad (8)$$

Топилган (8) ечим орқали сонли ҳисоб натижаси 1-расмда чизик 1 орқали тасвирланган. Расмдан кўринадики, ностационар суюқлик ҳолати ҳаракатнинг ноль қийматидан бошланиб бирга интилгандаги монотон ўсиш шаклидаги жараён билан яқунланади. Бу жараённинг стационар ҳолатга ўтиш вақти ўлчамсиз вақтнинг тахминан 1,5 қийматига мос келади.

Шульман-Хусид модели асосида юқорида ечилган (7) масаланинг сонли ҳисоб натижалари 1-расмда 2- ва 3-чизиклар билан берилган.



**1-расм.** Ностационар оқимда эластик ёпишқоқ суюқлик максимал бўйлама тезлигининг стационар ҳолатдаги максимал бўйлама тезлигига нисбатининг вақтга боғлиқ равишда ўзгариши (1 – Ньютон суюқлиги учун; 2 –  $EL = 2$ ,  $\alpha = 2$ ,  $\xi(2) \approx 1.7$  ва 3 –  $EL = 1$ ,  $\alpha = 2$ ,  $\xi(2) \approx 1.7$  бўлганда Шульман-Хусид модели учун)

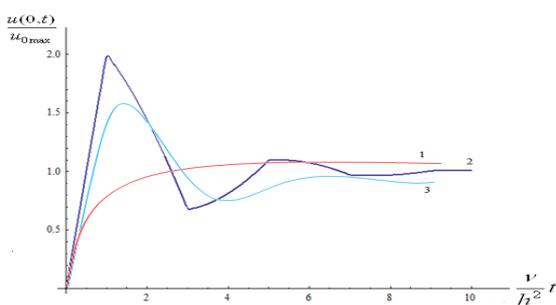
Расмдан кўринадики, эластик ёпишқоқ суюқликнинг стационар ҳолатга ўтиш жараёни Ньютон суюқлигидаги жараёндан тубдан фарқ қилади. Бунда эластик элементларнинг суюқлик оқимида қатнашиши оқимда номонотон ҳолатларнинг содир бўлишига олиб келади. Худди шундай ҳодиса эластик ёпишқоқ суюқлик ҳаракатининг Шульман-Хусид моделида намоён бўлмоқда. 1-расмда дастлаб суюқликнинг максимал нисбий тезлиги Ньютон ҳаракатидаги нисбий максимал тезликдан 1,5-2 бараварга ўсиши, кейин эса бир қиймат атрофида тебраниши ва шу қийматга асимптотик яқинлашиши кўрсатилган.

Юқорида эластик ёпишқоқ суюқлик учун Шульман-Хусид моделидан хусусий ҳолда Максвелл моделига ўтиш йўли келтирилди. Бу ҳол ечимдаги  $\alpha$  релаксация вақти спектри тақсимланишини характерловчи соннинг чексизликка интилгандаги қиймати билан ифодаланди ва ундан ўқдаги бўйлама тезлик қуйидагича аниқланган:

$$\frac{u(0,t)}{u_{0\max}} = 1 + 32 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3 \pi^3 \frac{(1-2EL\bar{s}_{in})}{(1-EL\bar{s}_{in})^2}} e^{-\frac{\nu}{h^2 \bar{s}_{in}} t} \quad (9)$$

бу ерда:  $u_0$  – Пуазейль бўйича максимал бўйлама тезлик.

Максвелл модели учун ҳисобларда (9) формуладан фойдаланилди. Эластик ёпишқоқ суюқлик оқимининг физик хусусиятларидан бири – дастлаб тезлик ўзининг максимал қийматига эришиши, кейин монотон камайиши ва охирида стационар оқимга ўтишидан иборат. Оқимда тезлик, суюқлик сарфи ва бошқа гидродинамик катталикларнинг тебранма ўзгаришлари кузатилади. Худди Шульман-Хусид моделидаги каби олинган ечим (9) формуладан фойдаланиб, Максвелл модели бўйича берилган эластик ёпишқоқ суюқликнинг ясси каналдаги ностационар ҳолатдан стационар ҳолатга ўтиш жараёни таҳлил қилинган.

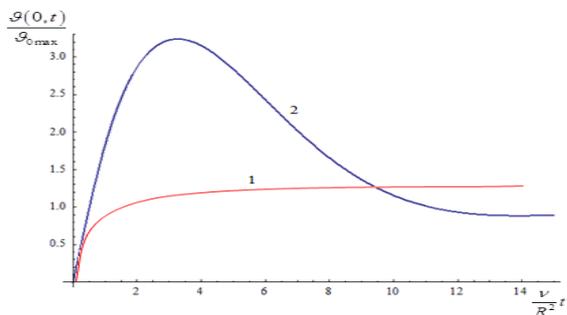


**2-расм.** Ностационар оқимда эластик ёпишқоқ суюқлик максимал тезлигининг стационар ҳолатдаги максимал тезликка нисбатининг вақтга боғлиқ равишда ўзгариши (1 – Ньютон суюқлиги учун; 2 – Максвелл суюқлиги ва  $EL=1$  учун; 3 – Шульман-Хусид моделида  $EL=1$ ,  $\alpha=2$ ,  $\xi(2) \approx 1.7$  бўлганда)

2-расмда эластик ёпишқоқ суюқликнинг Ньютон, Максвелл ва Шульман-Хусид моделлари асосида стационар ҳолатга ўтиш жараёни акс эттирилган. Расмдан кўринадики, эластик ёпишқоқ суюқликнинг Максвелл ва Шульман-Хусид моделлари асосида берилган босим градиентда стационар ҳолатга ўтиш Ньютон суюқлигидан фарқли равишда тўлқинсимон шаклда намоён бўлар экан. Максвелл суюқлигида ўтиш вақти Ньютон суюқлиги ва Шульман-Хусид суюқлигидаги ўтиш вақтидан бир неча баравар катта бўлишини кўриш мумкин.

Бу бобда цилиндрик қувурда эластик ёпишқоқ суюқликнинг ностационар оқими ҳам қаралган бўлиб, унда эластик ёпишқоқ суюқликнинг ҳаракати соддалашган тенгламалар орқали ифодаланган. Бу тенгламалар системасини ечиш учун бошланғич ва чегаравий шартлар шакллантирилган. Улардан фойдаланиб, эластик ёпишқоқ суюқликнинг ҳаракати тенгламалари Лаплас-Карсон алмаштиришлари асосида ечилган. Олинган ечим ёрдамида Шульман-Хусид ва Ньютон суюқликларига тегишли сонли натижалар 3-расмда келтирилган. Расмдан кўринадики, дастлаб суюқликнинг бўйлама тезлиги монотон ўсиб энг катта қийматга эришади ва

бу қиймат Ньютон суюқлигидаги максимал қийматдан 3–3,5 баравар катта бўлади. Кейин тезлик тебранувчи режимда камайиб ва ниҳоят вақтнинг кейинги қийматларида Ньютон суюқлигидаги қийматга интилади. Бундай ҳолатнинг кучайиши эластиклик коэффициенти қийматининг ўсишига боғлиқ равишда намоён бўлади.



**3-расм.** Эластик ёпишқоқ суюқлик оқимининг ностационар ҳолатдаги бўйлама тезлик максимал қийматининг ньютон суюқлиги оқимидаги максимал бўйлама тезлик қийматига нисбатининг вақтга боғлиқ равишда ўзгариши (1 - Ньютон суюқлиги учун; 2 - Шулман-Хусид модели учун  $EL=1$ ,  $\alpha=2$  бўлганда)

Бу бобда ясси каналда босим градиенти олиб ташлангандан кейин, яъни иш жараёнини тўхтатиш натижасида эластик ёпишқоқ суюқликларнинг стационар ҳолатга ўтиш жараёни ҳам тадқиқ қилинган бўлиб, бунда эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ностационар ҳаракати Ньютон суюқлигининг ностационар ҳаракатидан тубдан фарқ қилиши кўрсатилган. Ньютон суюқлигида стационар режимга ўтиш монотон камайувчи режимда амалга ошадиган бўлса, эластик ёпишқоқ суюқлик оқимида Ньютон суюқлик оқимида мавжуд бўлмаган оқимга қарши йўналишда эластик қайтиш оқими кузатилади. Босим градиенти олиб ташлангандан сўнг суюқлик ҳаракатида барча гидродинамик параметрлар қийматлари тўсатдан камайиши, жумладан тезлик, суюқлик сарфи ва бошқа гидродинамик катталиклар қийматлари Ньютон суюқлигининг стационар ҳолатдаги қийматига қараганда 1.5–2 марта кичик бўлиши, оқимга қарама-қарши йўналишда ҳаракат пайдо бўлиши аниқланган.

Диссертациянинг “**Ясси каналларда ва цилиндрик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликларнинг пульсацияли оқимлари**” деб номланувчи учинчи бобида даврий равишда ўзгарувчи босим градиенти таъсирида бўладиган ясси каналлардаги эластик ёпишқоқ суюқликларнинг стационар пульсацияли оқимига бағишланган масалалар ечилган ва тадқиқ қилинган. Бунда босим градиентининг вақт бўйича ўзгариши синусоидал кўринишда берилган:

$$(-\partial p / \partial x) = (-\partial p / \partial x)_0 (1 + \Lambda \cos \omega t), \quad (10)$$

бу ерда:  $\Lambda$  – тебранишнинг нисбий амплитудаси;  $\omega$  – тебраниш частотаси;  $(-\partial p / \partial x)_0$  – тебранишсиз стационар оқимдаги босим градиенти.

Масалани шакллантиришда ясси канал деворлари орасидаги масофа  $2h$ , канал узунлиги  $L$  деб белгиланди. Бу ерда  $L$  етарлича катта бўлиб,  $h/L \ll 1$  шарт бажарилиши таъминланади. Бундай ҳолларда оқим стабиллашган ва вертикал ўқ бўйича тезлик қиймати жуда кичик бўлганлиги учун нолга тенглаб олинган. Эластик ёпишқоқ суюқликнинг пульсацияли ҳаракати биринчи бобда келтирилган, соддалаштирилган

дифференциал тенгламалар системаси ёрдамида ифодаланган. Ясси каналда оқим горизонтал ўққа нисбатан симметрик бўлганлигидан фойдаланиб, чегаравий шартлар шакллантирилган. Босим градиенти иккита қисмдан – ўзгармас ва вақт бўйича ўзгарувчи даврий функциядан иборат бўлганлиги сабабли босим градиентининг ўзгармас қисми стационар оқимни, вақт бўйича ўзгарувчи қисми эса тебранувчи оқимни ифодалашни кўрсатилган. Шу боисдан тенгламалар системасининг ечими иккита тезлик функциялари йиғиндиси шаклида изланган.

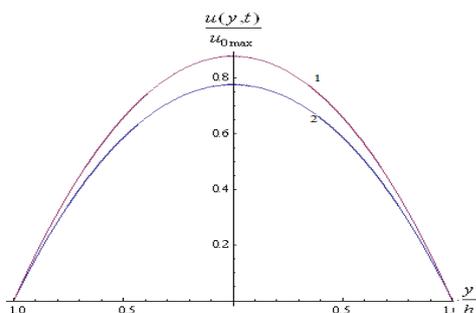
Топилган ечимдан хусусий ҳолда Ньютон суюқлиги пульсацияли оқимидаги бўйлама тезликнинг тақсимланиш қонунини аниқловчи формула келтириб чиқарилган. Пульсацияли оқимларда тезлик тақсимланишини аниқловчи ҳисоблаш формулаларини ҳосил қилиш учун ечимнинг ҳақиқий қисми ажратилган:

$$\frac{u(y,t)}{u_{0\max}} = \left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right) + 2\Lambda W. \quad (11)$$

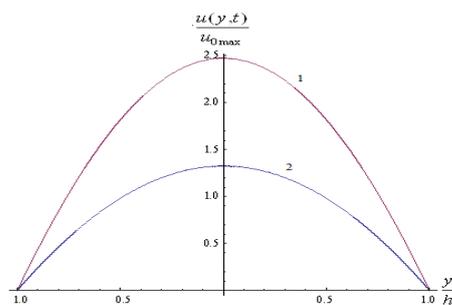
Бу ерда ўнг томондаги биринчи ҳад – тезликнинг стационар ташкил этувчиси, иккинчи ҳад  $2\Lambda W$  эса пульсацияли оқимнинг ташкил этувчиси бўлади, бунда  $W$  ифоданинг ҳақиқий қисмини ажратиш орқали, у ушбу кўринишга келтирилган:

$$2W = 2 \frac{\sin \omega t}{\alpha_0^2} - \frac{2}{\alpha_0^2 (\bar{A}^2 + \bar{B}^2)} \left[ (\bar{A} \cos M_1 \bar{y} \operatorname{ch} \bar{M}_1 \bar{y} - \bar{B} \sin M_1 \bar{y} \operatorname{sh} \bar{M}_1 \bar{y}) \times \right. \\ \left. \times \cos \omega t + (\bar{B} \cos M_1 \bar{y} \operatorname{ch} \bar{M}_1 \bar{y} + \bar{A} \sin M_1 \bar{y} \operatorname{sh} \bar{M}_1 \bar{y}) \sin \omega t \right]. \quad (12)$$

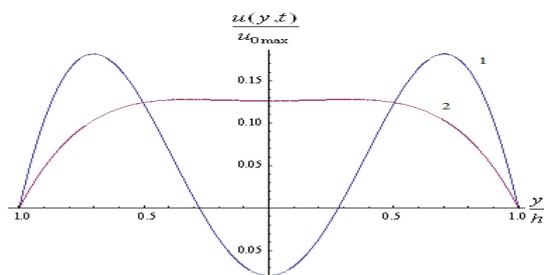
Бу ердаги  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $M_1$ ,  $\bar{M}_1$  ўзгармас коэффициентларнинг қийматлари эластик ёпишқоқ ва Ньютон суюқликлари учун аниқланган. Тезлик тақсимланиши учун аниқланган (12) формуланинг сонли ҳисоб натижалари келтирилган. Бунда эластик ёпишқоқ суюқликнинг пульсацияли оқимида тезликнинг ўзгариши  $EL$  эластиклик сонига боғлиқ равишда Ньютон суюқлиги тезлигидан фарқ қилиши кўрсатилган. 4-расмда  $\omega t = 0$  бўлгандаги Ньютон суюқлигининг пульсацияли оқимида тебранишлар частотасининг икки хил қийматларидаги бўйлама тезликнинг канал кесими бўйича тақсимланиши кўрсатилган. Расмдан кўринадики, тебранишлар частотасининг катталашган қийматларида тезлик тебраниш амплитудаси камайиб борар экан. Эластик ёпишқоқ суюқликларнинг пульсацияли оқимида эса эластиклик коэффициентининг бирга яқинлашган қийматларида бунга тескари бўлган ҳолат рўй беради, яъни тебранишлар частотасининг бир сонидан кичик қийматларида ҳам тезлик тебраниш амплитудаси катталашади. Бу ҳолат 5-расмда тасвирланган. Лекин эластик ёпишқоқ суюқлик оқимида  $EL \geq 2$  бўлганда  $M$ -симон тезлик тақсимотлари Ньютон суюқлиги оқимидаги тезлик тақсимотларига караганда тебраниш сонининг катта бўлмаган қийматларида ҳам пайдо бўлиши кузатилади (6-расм).



**4-расм.** Ясси канал кесими бўйича Ньютон суюқлиги учун бўйлама тезлик ташкил этувчисининг пульсацияли оқимдаги тақсимоти ( $\omega t = 0$  да: 1 –  $EL = 0$ ,  $\alpha_0 = 0,01$ ; 2 –  $EL = 0$ ,  $\alpha_0 = 1$ )



**5-расм.** Ясси канал кесими бўйича эластик ёпишқоқ суюқлик учун бўйлама тезлик ташкил этувчисининг пульсацияли оқимдаги тақсимоти ( $\omega t = 0$  да: 1 –  $EL = 3$ ,  $\alpha_0 = 1$ ,  $\alpha = 2$ ; 2 –  $EL = 1$ ,  $\alpha_0 = 1$ ,  $\alpha = 2$ )



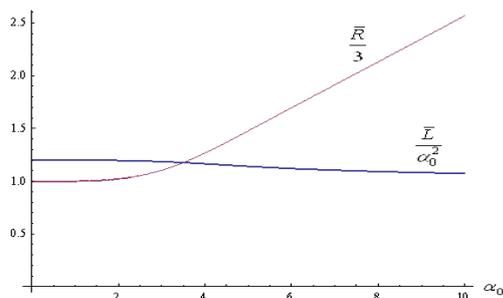
**6-расм.** Ясси канал кесими бўйича бўйлама тезлик ташкил этувчисининг пульсацияли оқимдаги тақсимоти ( $\omega t = 0$  да: 1 – эластик ёпишқоқ суюқлик учун  $EL = 1$ ,  $\alpha_0 = 2,5$ ,  $\alpha = 2$ ; 2 – Ньютон суюқлиги учун  $EL = 0$ ,  $\alpha_0 = 2,5$ )

Бундай ҳолатнинг рўй бериши пульсацияли оқимда тезликлар тақсимотида  $M$ -симон профилнинг пайдо бўлиши билан изоҳланади. Гидравлик қаршилик (импеданс)нинг Ньютон суюқлиги оқимида ҳамда эластик ёпишқоқ суюқлик оқимида характерли хусусияти шундан иборатки, бунда оқимдаги гидравлик қаршиликнинг ўзгариши аниқланиб, унинг ортиши ёки камайиши орқали оқимдаги суюқлик сарфининг ошиши ёки камайиши аниқланади. Одатда, гидравлик қаршилик босим градиентининг суюқлик сарфига нисбати билан аниқланади:

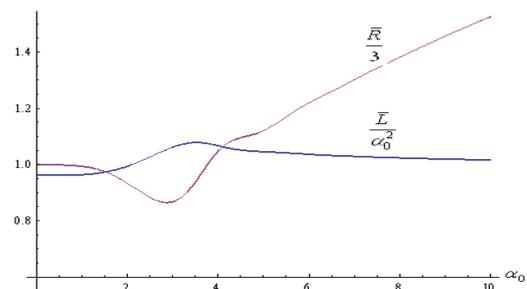
$$Z = \frac{\left(-\frac{\partial p}{\partial x}\right)}{Q} = \left[ \frac{1}{i\alpha_0^2} \left( 1 - \frac{\sin(M_1 - i\bar{M}_1)}{(M_1 - i\bar{M}_1) \cos(M_1 - i\bar{M}_1)} \right) \right]^{-1} = \bar{R} + i\bar{L}. \quad (13)$$

Топилган (13) формуланинг ҳақиқий ва мавҳум қисмлари ажратилиб,  $\bar{R}$  гидравлик қаршиликнинг ҳақиқий қисмга мос келувчи ва  $\bar{L}$  индуктивликнинг мавҳум қисмга мос келувчи қийматлари аниқланган.

Ньютон суюқлиги учун импедансни тадқиқ этиш натижаси кўплаб ишларда келтирилган бўлишига қарамадан, эластик ёпишқоқ суюқлик учун у биринчи марта тадқиқ этилмоқда. Юқорида импеданс учун топилган (13) формула ёрдамида сонли ҳисоб амалларини бажариб, Ньютон ва эластик ёпишқоқ суюқликларнинг пульсацияли оқимлари учун гидравлик қаршилик ва индуктивликнинг тебраниш частотасига боғлиқ равишда ўзгариши тадқиқ қилинган. Тадқиқот натижалари 7-8-расмларда келтирилган.



**7-расм.** Гидравлик қаршилик  $\bar{R}$  ва индуктивлик  $\bar{L}$  нинг эластиклик коэффиценти  $EL=0$  бўлгандаги қийматида тебранишлар частотаси параметри  $\alpha_0$  га боғлиқ равишда ўзгариши



**8-расм.** Гидравлик қаршилик  $\bar{R}$  ва индуктивлик  $\bar{L}$  нинг эластиклик коэффиценти  $EL=0.1$ ,  $\alpha=2$  бўлгандаги қийматида тебранишлар частотаси параметри  $\alpha_0$  га боғлиқ равишда ўзгариши

Расмдан кўринадикки, Ньютон суюқлиги оқимида тебраниш частотаси қийматларининг ошиши билан гидравлик қаршилик катталаша боради, индуктивлик эса жуда оз миқдорда камайиб, қиймати бирга интилади.

Эластиклик коэффицентининг 0.01 дан катталашган қийматларида суюқликларнинг пульсацияли оқимларидаги гидравлик қаршилик ва индуктивликнинг ўзгариши Ньютон суюқлигидан фарқ қила бошлайди. Бунда гидравлик қаршилик эластиклик коэффицентининг ўсиши натижасида Ньютон суюқлиги оқимидагига қараганда сезиларли равишда камаяди. Эластиклик коэффицентининг кейинги ўсиши давомида гидравлик қаршиликнинг кескин камайиши ва тебраниш частотасининг  $2 \leq \alpha_0 \leq 4$  қийматлар оралиғида бу камайиш максимал даражага етиши кузатилади.

## ХУЛОСА

“Трубопроводларда эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ностационар ва пулсацияли оқимлари” мавзусидаги диссертация иши бўйича қуйидаги хулосалар тақдим этилди.

1. Максвелл типидagi суюқлик моделлари асосида Шульман-Хусид томонидан умумлаштирилган эластик ёпишқоқ суюқликларнинг реологик тенгламалари “кучланишлар” шаклидаги суюқлик ҳаракати дифференциал тенгламалари билан биргаликда олиниб, эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ҳаракати дифференциал тенгламалари шакллантирилди.

2. Ўлчамсиз катталикларга ўтиш ва тенгламаларнинг кичик миқдордаги ҳадларини ташлаб юбориш орқали эластик ёпишқоқ суюқликларининг ҳаракат дифференциал тенгламаларини соддалаштириш ва чизиқлаштириш услубияти ишлаб чиқилди. Натижада бу тенгламалар асосида гидродинамиканинг қатор ички масалаларини шакллантириш ва ечиш имкониятлари яратилди. Муайян ҳолларда, канал ва цилиндрлик қувурларда эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ностационар ва пульсацияли оқимлари масалаларини ечиш учун бошланғич ва чегаравий шартлар шакллантирилди.

3. Текис ясси ва ўққа симметрик каналлар учун Лаплас-Карсон алмаштиришларини қўллаш ёрдамида эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ностационар оқими масаласи ечилди. Бунда нолдан фарқли ўзгармас босим градиентининг тўсатдан пайдо бўлиши ва унинг тўсатдан олиб ташланиши натижасидаги эластик ёпишқоқ суюқликларнинг ҳаракати масалалари ечими олинди. Ечим натижаларининг таҳлилига кўра, ўтиш жараёнида эластик ёпишқоқ суюқликнинг ясси каналлардаги ҳаракатида ўртача тезлик Ньютон суюқлиги ҳаракатидаги ўртача тезлигидан икки-уч баравар катта бўлиши ва босим градиенти олиб ташланганидаги оқимда тескари оқим пайдо бўлиши ва унинг тезлиги Ньютон суюқлиги ҳаракатидаги камайиш тезлигидан бир ярим-икки баробар катта эканлиги исботланди.

4. Босими пульсацияли ва осцилляцияли оқимларга Фурье қаторининг комплекс шаклини қўллаб, эластик ёпишқоқ суюқликнинг текис ясси каналлардаги оқими масаласи ечилган. Бу ечим натижалари таҳлили Рейнольдснинг тебранишлар сони  $Re_\omega$  ва эластиклик параметри  $EL$  га боғлиқ равишда оқимнинг лимит режимларини таҳлил этиш, бўйлама тезликнинг  $M$ -симон профили ҳосил бўлиш интервалини аниқлаш имконини берди.

5. Гидравлик қаршилик ва индуктивликнинг тебраниш частотаси параметрига боғлиқ равишда ўзгаришини аниқлаш орқали Ньютон суюқлиги оқимидаги гидравлик қаршиликдан эластик ёпишқоқ суюқлик оқимидаги эластиклик коэффициентининг ўсишига қараб гидравлик қаршилик сезиларли равишда камайиши аниқланди. Индуктивликнинг ўзгариши эса тебраниш частотасининг кичик қийматларида секин камайиб, кейинчалик тебраниш частотасининг катта қийматларида бирга интилиши кўрсатилди. Эластиклик коэффициентининг кейинги ўсиши давомида гидравлик қаршиликнинг, тебраниш частотаси параметрининг  $2 < \alpha_0 < 4$  қийматлари оралиғида кескин камайиши аниқланди.

6. Диссертация ишининг натижалари давлат фундаментал грантларини бажаришда фойдаланилган. Ишнинг натижалари Ўзбекистон Республикаси Уй жой-коммунал хизмат кўрсатиш вазирлиги тармоқларида оқова сувларни насос механизмлари ёрдамида узатиш жараёнига жорий қилинган. Қувурларда оқова сувлар ҳаракатини ўрганиш натижасида гидравлик қаршиликни камайтиришнинг янги усуллари аниқланди. Бунда тебранишларни сўндиришнинг самарали усулларида фойдаланиб, насос механизмларининг иш унумдорлигини 10 – 15 % га ошириш мумкин.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ МЕХАНИКИ И  
СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

---

**УРГЕНЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ШУКУРОВ ЗОХИД КУЧКАРОВИЧ**

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ И ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ТЕЧЕНИЯ  
УПРУГОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ТРУБОПРОВОДАХ**

01.02.05 – Механика жидкости и газа

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ  
(PhD) ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ургенч – 2021

**Тема диссертации доктора философии(PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована Высшей аттестационной комиссией при Кабинете Министров Республики Узбекистан № В2018.1.PhD/FM174**

Диссертация выполнена в Ургенчском государственном университете.

Афтореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском) размещен на веб-странице Научного совета([www.instmech.uz](http://www.instmech.uz)) и информационно-образовательном портале "Ziyonet" ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:**

**Наврузов Куралбай**

доктор физико-математических наук,  
профессор

**Официальные оппоненты:**

**Базаров Дилшод Раимович**

доктор технических наук, профессор

**Маткаримов Санъат Юсубович**

кандидат физико-математических наук,  
доцент

**Ведущая организация:**

**Научно-исследовательский институт  
иригации и водных проблем**

Защита диссертации состоится «14» июль 2021 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019. Т/FM.61.01 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений Адрес: 100000, г. Ташкент, ул. Дурман йули, 33, зал заседаний – 1. Тел.:(99871) 262-71-52; факс:(99871) 262-71-32, e-mail: [instmech@academy.uz](mailto:instmech@academy.uz).

С диссертацией (PhD) можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института механики и сейсмической стойкости сооружений (регистрационный номер -7). Адрес: 100000, г. Ташкент, ул. Дурман йули, 33. Тел. (99871) 262-71-32.

Автореферат диссертации разослан «28» июнь 2021 года.  
(реестр Протокола рассылки №3 от «28» июнь 2021 года)

**М.М.Мирсаидов**

Председатель Научного совета по присуждению  
ученых степеней, д.т.н., профессор, академик АН РУз

**М.К.Усаров**

Ученый секретарь Научного совета по присуждению  
ученых степеней, д.т.н., с.н.с.

**З.М.Маликов**

Председатель Научного семинара при Научном  
совете по присуждению ученых степеней, д.т.н., с.н.с.

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Эффективное использование жидкостей и газов, в том числе в отраслях экономики – нефтяной промышленности (транспортировка нефти и нефтепродуктов по трубопроводу), в химической промышленности, продовольственной отрасли (при изучении вопросов транспортеров, пневматических конвейеров), в текстильной и хлопкоочистительной промышленности (при проектировании и анализе надежности технологических установок по очистке хлопка-сырца, получении синтетических материалов), в гидротехнике (при очистке труб от осадков, транспортировке твердых частиц) является приоритетной задачей мирового масштаба. В этой связи особое внимание уделяется наличию возможностей ускорения и улучшения процессов плавки, сушки, очистки жидкостей и газов в определенных условиях их нестационарных и пульсирующих течений и других процессов. В этом смысле особое значение имеет теоретическое и практическое исследование процессов конвективного перемещения жидкостей и газов в США Великобритании, Нидерландах, Германии, Бельгии, Китая, Южной Кореи, России, Узбекистана.

В мире особое внимание уделяется осуществлению целевых научно-исследовательских работ, направленных на отражение нелинейных моделей неньютоновских жидкостей с учетом, а иногда без учета релаксации. К подобным видам жидкостей относятся полимерные растворы, суспензии, растворы с наносами, масляные краски, кондитерские, фармацевтические и продовольственные продукты, ракетное топливо, строительные и буровые растворы, жидкие композитные материалы, а также, физиологические жидкости – кровь, слюна и другие. Течения выше указанных жидкостей можно математически моделировать в качестве неньютоновских жидкостей в цилиндрических и плоских трубах с учетом их реологических свойств, потому что это связано с вопросами распространения прогрессивных методов транспортировки по трубопроводу и использования полимерных и синтетических материалов при изготовлении труб.

В республике особое внимание уделяется использованию синтетических волокон, совершенствованию методов подпочвенного, поверхностного, капельного, бороздкового орошения с помощью гибких труб, изготовленных из композитных материалов, повышению требований к технологическим процессам, к примеру, по обеспечению необходимых реологических свойств жидкости при бурении скважин, улучшению выноса расщепленного минерала по кольцевому трубопроводу. В частности, в агрегатных установках и механизмах насосных станций наблюдается выход из строя множества рабочих систем. Нужно отметить, что основной причиной возникновения подобных нежелательных случаев является изменение особенностей жидкостей под влиянием температуры, давления или других факторов. Данная научная работа посвящена решению таких проблем, чем и обосновывается ее актуальность и необходимость. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017–2021 годах, в частности, намечены задачи “...по дальнейшей модернизации

и диверсификации промышленности путем перевода его на качественно новый уровень, направленного на опережающее развитие высокотехнологичных обрабатывающих отраслей, прежде всего по производству готовой продукции с высокой добавленной стоимостью на базе глубокой переработки местных сырьевых ресурсов...»<sup>1</sup>. Это подтверждает важность изучения процессов течения неньютоновских жидкостей по трубам разных конфигураций.

Данная диссертационная работа в определенной степени служит осуществлению задач, намеченных в Указе Президента Республики Узбекистан ПП № 196 “О Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017-2021 годах ПП № 196” от 7 февраля 2017 года, в Постановлениях Президента Республики Узбекистан “О дополнительных мерах по стимулированию внедрения инновационных проектов и технологий в производство” от 15 июля 2008 года, ПП № 3107 “О совершенствовании системы управления нефтяной и газовой промышленности” от 30 июня 2017 года и другими нормативно-правовыми документами, принятыми с этой области деятельности.

**Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и техники республики.** Данное исследование выполнено в рамках приоритетного направления развития науки и техники республики IV. «Математика, механика и информатика».

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время научные исследования в области построения математических моделей, составления и совершенствования алгоритмов расчета остаточно-деформирующих жидкостей проводятся в передовых научных центрах и высших образовательных учреждениях мира, таких как NASA (National Aeronautics and Space Administration), Stanford University (АҚШ), Санкт-Петербургский государственный технический университет, Центральный аэродинамический университет (РФ), China Aerodynamics Research and Development Center (КНР), The Air Systems Research Center (Япония), Cambridge University (Буюк Британия), Computational Aerodynamics Institute (Канада), которые достигли больших успехов в данном направлении.

В данной сфере изучены реологические уравнения с помощью отражения тензора мощности через тензоры ограниченных деформаций Коши и Фингера в работах ряда авторов в том числе, Дж.Астарита, Дж.Марруччи, З.П. Шульман, Б.М.Хусида. А в научно-исследовательских работах Ж.Ф.Файзуллаева, Қ.Наврұзова в виде Максвелловской модели обобщены уравнения нелинейных реологических состояний жидкостей с памятью.

В данных работах показаны преимущества сложных реологических интегральных уравнений состояния жидкости при использовании их эквивалентности дифференциальных уравнений состояния и дифференциальных типов уравнений состояния упруговязких жидкостей в

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан “О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан” №УП-4947 от 7 февраля 2017 г.

решении конкретных практических задач.

В научных работах ученых мира, таких как У.Л.Улкинсон, К.Трудселл, Р.П.Чобра, Дж.Ф.Ричардсон, П.М.Огibalов, А.Х.Мирзаджанзаде и других изучены нестационарные и пульсирующие ламинарные турбулентные потоки ньютоновских и неньютоновских жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах.

В работах отечественных ученых, таких как Ж.Ф.Файзуллаев, Ж.А.Акилов, Б.Х.Хужаёров, К.Ш.Латипов, О.И.Умаров, Қ.Наврузов, З.М.Маликов, И.Қ.Хужаев, С.И.Худайкулов, Д.Р.Базаров и других проведены исследования по решению конкретных практических задач нестационарных и пульсирующих жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах путем использования их реологических моделей, разработке аналитических методов и в этом направлении достигнуты больших успехов.

Несмотря на то, что в направлении изучения движения неньютоновских жидкостей, в настоящее время задачи с помощью модели Шульмана-Хусида изучены и внедрены в практику но не на достаточном уровне. В том числе, не изучены в деталях различия гидродинамических изменений, происходящие в нестационарных потоках в при резком подъеме градиента давления и его резком падении до нулевого значения в упруговязких жидкостях. Не выявлены закономерности изменения гидравлического сопротивления в зависимости от параметров частоты колебаний в пульсирующих и осцилляционных потоках упруговязких жидкостей, различия в закономерностях изменений ньютоновских и других жидкостей путем решения практических задач и не показаны его преимущества.

**Связь диссертационной работы с планом научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где она выполнена.** Диссертация выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ кафедры “Прикладная математика” Ургенчского государственного университета в рамках научно-исследовательского проекта ОТ-Ф4-04(05) “Применение спектрального метода решения материально-нелинейных эволюционных уравнений. Биомеханика сердечно-сосудистой систем” (2017-2020).

**Целью исследований** является совершенствование реологических моделей упруговязких жидкостей в форме модификации Шульмана-Хусида, обоснование преимуществ данной модели по сравнению с моделями Ньютона, Максвелла, исследование задач нестационарных и пульсирующих течений упруговязких жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах.

**Задачи исследований:**

на основе модифицированной модели упруговязких жидкостей сформулировать новые задачи нестационарных, пульсирующих течений в плоских каналах и цилиндрических трубах с соответствующими начальными и граничными условиями;

аналитическое решение задач нестационарных и пульсирующих течений упруговязких жидкостей, симметричных по отношению к оси, и провести их анализ;

определение закономерностей распределения скоростей и изменения расхода жидкости в нестационарных и пульсирующих течениях упруговязких жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах, показать различия и преимущества их по отношению к закономерностям Ньютоновской жидкости;

изучение закономерностей резкого увеличения расхода жидкости в нестационарных течениях, являющегося одним из основных причин возникновения высоких нагрузок в плоских каналах и цилиндрических трубах, резкого снижения расхода жидкости в торможенных течениях и появления в них обратного течения;

путем сравнения закономерностей течения Ньютоновской жидкости выявить новые гидродинамические законы в пульсирующих и осциллирующих потоках упруговязких жидкостей в зависимости от параметра частоты колебаний гидравлического сопротивления.

**Объектом исследований** являются нестационарные, пульсирующие и осциллирующие потоки упруговязких жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах.

**Предметом исследований** являются математические модели нестационарных, пульсирующих и осциллирующих потоков упруговязких жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах.

**Методы исследования.** При решении задач нестационарных, пульсирующих и осциллирующих течений упруговязких жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах использовано преобразование Лапласа-Карсона. При решении задач колеблющихся потоков применены методы решения уравнений математической физики.

**Научная новизна исследований** состоит из следующих:

на основе обобщенных реологических моделей сформированы основные дифференциальные уравнения движения упруговязкой жидкости и предложены упрощенные варианты решения задач их транспортировки по трубопроводам;

усовершенствованы методы решения задач движения нестационарных, пульсирующих и осциллирующих потоков упруговязких жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах;

в результате анализа новых решений поставленных задач определены интервалы параметров упруговязких жидкостей;

определены новые гидродинамические законы процессов “упругого подъема” и “упругого возврата” потоков неньютоновских жидкостей в зависимости от параметра частоты колебаний.

**Практические результаты исследований** заключаются в следующем:

предложенные методы решения задач нестационарных, пульсирующих и осциллирующих течений упруговязких жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах позволяют определить возникновение резонанса,

являющегося основной причиной выхода из строя механизмов при запуске и отключении насосных установок;

согласно полученным результатам определен интервал убывания гидравлического сопротивления в пульсирующих потоках упруговязкой жидкости в плоских каналах и цилиндрических трубах;

выявлено, что решение задачи пульсирующего потока упруговязкой жидкости имеет большое значение при очистке плоских каналов и цилиндрических труб от осадков, наносов и других.

**Достоверность результатов исследований** обосновываются тем, что исследования проведены с использованием современных методов и средств, строгим использованием правил теоретической и практической механики, соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также внедрением результатов в практику.

**Научная и практическая значимость результатов исследований.** Научная значимость результатов исследований заключается в том, что на основе обобщенных реологических моделей сформулированы основные дифференциальные уравнения движения упруговязкой жидкости, усовершенствованы методы решения задач нестационарных, пульсирующих и осциллирующих потоков упруговязких жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах, созданы возможности определения новых гидродинамических законов процессов “упругого подъема” и “упругого возврата” потоков неньютоновских жидкостей.

Практическое значение исследований заключается в создании возможности оценки таких аспектов упруговязких жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах, как резонансное явление, промежуток снижения гидравлического сопротивления и очистка плоских каналов и цилиндрических труб от наносов, осадков.

**Внедрение результатов исследований.** На основе исследований нестационарного и пульсирующего движения вязкопластических жидкостей в плоскопараллельных каналах и осесимметричных трубопроводах:

результаты исследований пульсирующего движения крови в артериальных сосудах, с учетом схожести свойств крови со свойствами упруговязких материалов, использованы в фундаментальном гранте №Ф-4-42 “Биомеханика сердца и ее применение” (Справка №89-03-1661 Министерства Высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан от 29 апреля 2019 года и справки Хорезмского и Самаркандского областного филиалов Республиканского научного центра экстренной медицинской помощи Министерства здравоохранения Республики Узбекистан). В результате появилась возможность определения гидравлического сопротивления в артериальных сосудах на основе законов распределения и угасания пульсирующих волн, полученных с помощью программы по математическому моделированию артериальной системы;

результаты внедрены в Самаркандском областном государственном унитарном предприятии “Сувокова” Самаркандского областного управления жилищно-коммунальных услуг Министерства жилищно-коммунальных услуг

Республики Узбекистан в целях эффективного использования насосных станций при транспортировке сточных вод (акты приведены в Приложениях диссертации). Результаты внедрены при управлении подачей воды в районы и распределения ее через трубопроводы “Зарафшанским бассейновым управлением ирригационных систем” в Самаркандской области и “Амударьинским левобережным бассейновым управлением ирригационных систем” в Хорезмской области (акты приведены в Приложениях диссертации). В результате, принимая сточные воды в качестве неньютоновских жидкостей, благодаря гашению колебаний в процессе запуска и отключения насосных установок, появилась возможность оценки производительности насосных механизмов.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертации обсуждались на 2 международных научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе, в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан по изданию основных диссертационных работ доктора философии (PhD), опубликовано 8 статей (4 из них в республиканских и 4 – в зарубежных журналах).

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 124 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В введении** обоснована актуальность и необходимость темы диссертации, показано соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, обоснована достоверность полученных результатов, определены цель и задачи, а также предмет и объект исследования, раскрыты новизна исследований, его теоретическое и практическое значение, приведены данные о внедрении в практику результатов исследований и структуре диссертационной работы.

В первой главе диссертации “**Реологические модели упруговязких жидкостей и дифференциальные уравнения движения**” приведены реологические модели и дифференциальные уравнения движения упруговязких жидкостей. Для малых деформаций и медленных течений верхние и нижние конвективные производные в ортогональных декартовой и цилиндрической системах координат преобразуются на обычную производную. В силу этого модель Шульмана-Хусида приобретает вид модифицированной модели:

в системе декартовых координат:

$$\tau = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_k, \quad \lambda_k \frac{\partial \tau_k}{\partial t} + \tau_k = 2\eta_k D, \quad D = \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (1)$$

в системе цилиндрических координат:

$$\tau = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_k, \quad \lambda_k \frac{\partial \tau_k}{\partial t} + \tau_k = 2\eta_k \mathbf{D}, \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2} \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r}. \quad (2)$$

здесь:  $\lambda_k = \frac{\lambda}{k^\alpha}$ ,  $\eta_k = \frac{\eta}{\xi(\alpha)k^\alpha}$ ;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости

ньютоновской жидкости в начальном состоянии;  $\lambda$  – коэффициент релаксации (время);  $\alpha$  – число, характеризующее распределение спектра времени релаксации;  $\xi(\alpha)$  – дзета-функция Римана, определяемая

$$\xi(\alpha) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^\alpha}.$$

Из этой модифицированной модели Шульмана-Хусида в частном порядке получена Ньютоновскую модель и модель Максвелла. При стремлении значения  $\lambda$  к нулю получается Ньютоновская модель. Действительно, в если уравнениях (1) и (2) учесть  $\lim_{\lambda \rightarrow 0} \lambda_k = 0$ , то не трудно

будет вычислить выражение для декартовых систем координат  $T = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$  и

цилиндрических систем координат  $T = \eta \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r}$ . Эти формулы относятся к

модели Ньютоновской жидкости.

Известно, что Ньютоновская модель жидкости не включает в себя свойство упругости или влияние релаксации. Именно поэтому она называется моделью вязкой жидкости. Недостатком Ньютоновской модели является то, что она не учитывает свойство упругости жидкости. К сожалению, в технических и технологических процессах в большинстве случаев используются жидкости с упругими свойствами.

При стремлении числа  $\alpha$ , характеризующего спектр времени релаксации, к бесконечности в качестве частного случая модели Шульмана-Хусида получается реологическое уравнение для жидкости Максвелла. То есть, при  $\alpha \rightarrow \infty$  из (1) следует уравнение  $\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$  в декартовой системе

координат и уравнение  $\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r}$  в цилиндрической системе координат.

Эти уравнения выражают модель Максвелла.

Недостаток модели Максвелла по сравнению с моделью Шульмана-Хусида заключается в том, что упруговязкая жидкость принимается однородной и определяется только через одно время (коэффициенте) релаксации. А в модификации Шульмана-Хусида упруговязкая жидкость принимается как неоднородная среда и время релаксации (коэффициент) выражается в виде ряда последовательных приближений. Из них выбирается самый большой коэффициент релаксации, а последующие коэффициенты релаксации определяются в качестве ее доли, подчиняющейся определенной закономерности. Поэтому модификация модели Шульмана-Хусида принимается как обобщение модели Максвелла.

Также в данной главе выведены дифференциальные уравнения с симметричным тензором напряжения упруговязких жидкостей в двух – и трехмерных декартовых и цилиндрических координатах. Приведена методика упрощения задач путем создания линейных уравнений движения вязкой жидкости в трубах и каналах. Для этого представили, что течение симметрично относительно оси; длина трубы  $L$  значительно больше ширины  $h$  канала (или радиуса трубы  $R$ ):  $\frac{h}{L}; \frac{R}{L} \ll 1$ ; средняя поперечная скорость намного меньше чем средней продольной скорости  $U$ . Принимая во внимание данные предположения, оцениваются члены уравнений, приведенных в безразмерную форму с введением преобразований  $t = \lambda t_1, y = h y_1, x = L x_1, u = U u_1, \mathcal{G} = V \mathcal{G}_1, p = \frac{\eta U L}{h^2} p_1, \tau_{ij} = \eta \frac{U}{h} \tau_{1,ij}, \lambda_k = \lambda \lambda_{1,k}, \eta_k = \eta \eta_{1,k}$ .

В результате исключения малых членов из реологических уравнений и системы уравнений движения в “напряжениях” получены следующие системы уравнений:

в декартовых координатах:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \tau = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_k, \quad \lambda_k \frac{\partial \tau_k}{\partial t} + \tau_k = \eta_k \frac{\partial u}{\partial y}; \quad (3)$$

в цилиндрических координатах:

$$\rho \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rx}), \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \tau_{rx} = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_{k,rx}, \quad \lambda_k \frac{\partial \tau_{k,rx}}{\partial t} + \tau_{k,rx} = \eta_k \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r}. \quad (4)$$

Математическая постановка задач о нестационарных и пульсирующих течениях упруговязких несжимаемых жидкостей в цилиндрических трубах и плоских каналах завершается формированием начальных и граничных условий.

Жидкость в начальном состоянии не движется, то есть сохраняет состояние покоя. Начиная со времени  $t > 0$ , под воздействием постоянного градиента давления, отличающегося от нулевого значения, жидкость приходит в движение. Данный процесс сформулирован в качестве нестационарного движения упруговязкой жидкости в канале. Кроме того, используя возможности выражения одинаково колеблющегося давления в конечных сечениях труб и каналов выведены граничные условия.

Получена линейная форма системы уравнений, выражающих течение упруговязкой жидкости в плоских каналах и круглых цилиндрических трубах, и создана возможность получения ее аналитического решения при малых амплитудах колебаний.

Во второй главе диссертации “**Нестационарные течения упруговязких жидкостей в цилиндрических трубах и плоских каналах**” рассмотрены нестационарные течения упруговязкой жидкости в плоских каналах и круглых цилиндрических трубах. При формулировании задач о движении упруговязкой жидкости считается, что при  $t=0$  упруговязкая жидкость находится в состоянии покоя и под воздействием постоянного, отличного от нуля градиента, давления, жидкость приходит в движение. Данный процесс

сформулирован в качестве нестационарного движения упруговязкой жидкости в канале. При этом расстояние между стенками канала определяется как  $2h$ . Предположив, что канал имеет достаточно большую длину, выбирается сравнительная длина, характерная для течения упруговязких жидкостей. Отношение поперечного размера канала к длине по оси принимается как бесконечно малая величина, поэтому скорость по направлению продольной координаты незначительная, а ось  $x$  принимается в горизонтальном направлении, а ось  $y$  – перпендикулярно к оси  $x$  – в вертикальном направлении. Движение вязкоупругих жидкостей, с учетом ее реологических свойств, в плоских каналах выражается упрощенной системой уравнений, (3) сформулированных в первой главе.

Начальные и граничные условия для уравнений системы (3) приведены выше: до времени  $t=0$  жидкость находится в состоянии покоя. Предполагается, что при  $t>0$  под воздействием постоянного градиента давления жидкость начинает двигаться. Принято, что скорость жидкости на стенках канала и градиент продольной скорости на оси течения равны нулю. Для аналитического решения сформулированной задачи медленного течения жидкости с системой уравнений (3) с учетом краевых условий применялось преобразование Лапласа-Карсона и получены формулы для распределения продольной скорости потока. Так как в целом ожидаются сложные формулы, для упрощения исследования ограничивались рассмотрением процесса перехода упруговязких жидкостей из состояния покоя в стационарное состояние при асимптотических значениях параметров модели Шульмана-Хусида. При этом коэффициент безразмерной динамической упруговязкости в модели Шульмана-Хусида принимался в следующем виде:

$$\bar{\eta}(\bar{s}) = \frac{1}{\xi(\alpha)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(k^\alpha - EL\bar{s})}. \quad (5)$$

Для упрощения данного равенства рассмотрены два предельных варианта. Когда  $t \gg \lambda$  и  $|ELs| \ll 1$ , то решение отражает процесс перехода ньютоновской жидкости из состояния покоя в стационарное состояние. А при  $t \ll \lambda$  и  $|\lambda s| \gg 1$  состояние жидкости изучено отдельно. Здесь при выполнении условия  $|\lambda s| \gg 1$  уравнение (5) приведено к следующей асимптотической форме:

$$\bar{\eta}(s) = \frac{\pi}{\xi(\alpha) \alpha \sin \frac{\pi}{\alpha} (\lambda s)^{1-\frac{1}{\alpha}}}. \quad (6)$$

Поставив найденное выражение (6) в трансцендентное уравнение  $\frac{ih}{\sqrt{v}} \sqrt{\frac{s}{\bar{\eta}(s)}} = \frac{(2n+1)}{2} \pi$ , получено решение трансцендентного уравнения. Использованием его найдено решение для продольной скорости упруговязкой жидкости в плоском канале:

$$\frac{u(0,t)}{u_{0\max}} = 1 - 32 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\sqrt[3]{\xi^2(2)EL}}{3\sqrt[3]{(2n+1)^7} \pi^3} \left( \cos A\sqrt{3}t - \sqrt{3} \sin A\sqrt{3}t \right) e^{-\frac{\nu}{h^2}At}. \quad (7)$$

здесь:  $A = \frac{\sqrt[3]{(2n+1)^4} \pi^2}{8\sqrt[3]{\xi^2(2)EL}}.$

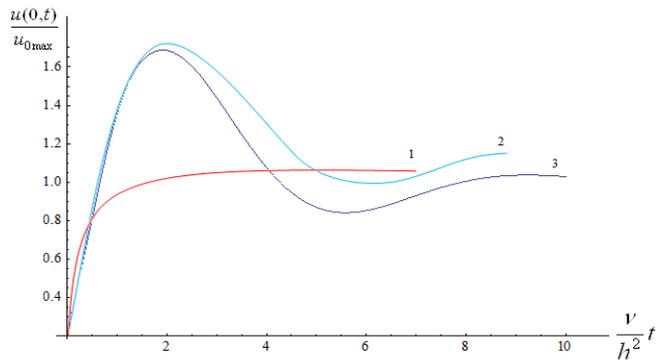
Используя найденное решение (7), исследован процесс перехода упруговязкой жидкости под влиянием постоянного градиента давления из состояния покоя в стационарное состояние.

Данный процесс для ньютоновских жидкостей описывается нулевым значением коэффициента релаксации:  $\bar{\eta}_k(s) = \eta \eta_k^*(s) = \eta$ . Соответственно, в этом случае решение трансцендентного уравнения составляет:  $\bar{s} = \frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2$ . С учетом этого найдено следующее решение задачи

$$\frac{u(0,t)}{u_{0\max}} = 1 + 32 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3 \pi^3} \cos\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{y}{h}\right) e^{-\frac{\nu}{h^2}\bar{s}t}. \quad (8)$$

Данное решение соответствует кривой 1 на рис. 1. Из рисунка видно, что нестационарное состояние движения жидкости начинается с нулевого значения скорости и заканчивается монотонным возрастанием до 1. Продолжительность переходного процесса соответствует примерно значению 1,5 безразмерного времени.

Результаты вычислений по (8) на основе модели Шульмана-Хусида приведены на рис. 1 в виде кривых 2 и 3.



**Рис. 1.** Изменение отношения максимальной горизонтальной скорости упруговязкой жидкости в нестационарном течении в зависимости от времени (1 – для ньютоновской жидкости; 2 и 3 – для модели Шульмана-Хусида при  $EL=2$ ,  $\alpha=2$ ,  $\xi(2) \approx 1.7$  и  $EL=1$ ,  $\alpha=2$ ,  $\xi(2) \approx 1.7$  соответственно)

Из рисунка видно, что переход упруговязких жидкостей из состояния покоя в стационарное состояние кардинально отличается от процесса, наблюдаемого в Ньютоновских жидкостях. Участие упругих элементов в потоке жидкостей приводит к возникновению немонотонного состояния. Подобное явление прослеживается в движениях упруговязкой жидкости по модели Шульмана-Хусида. В переходном процессе относительная скорость жидкости сначала увеличивается в 1,5-2 раза по отношению к максимальной относительной скорости в ньютоновской жидкости. В последующем она колеблется около единичного значения, асимптотически приближаясь к этой отметке.

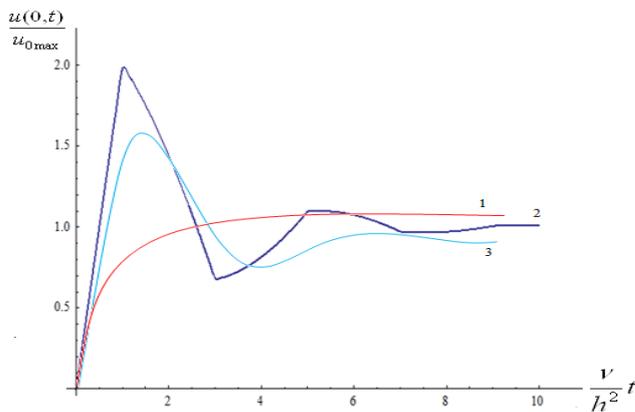
Выше показан переход из модели Шульмана-Хусида для упруговязкой

жидкости к модели Максвелла. Данный переход осуществляется стремлением к бесконечности значения  $\alpha$ , характеризующего спектр распределения времени релаксации. При этом приведенная продольная скорость течения на оси определена в виде:

$$u(0,t) / u_{0\max} = 1 + 32 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 \left( (-1)^n / (2n+1)^3 \pi^3 \frac{(1-2EL\bar{s}_{in})}{(1-EL\bar{s}_{in})^2} \right) e^{-\frac{v}{h^2} \bar{s}_{in} t}. \quad (9)$$

здесь:  $u_{0\max}$  – максимальная продольная скорость по Пуазейлю.

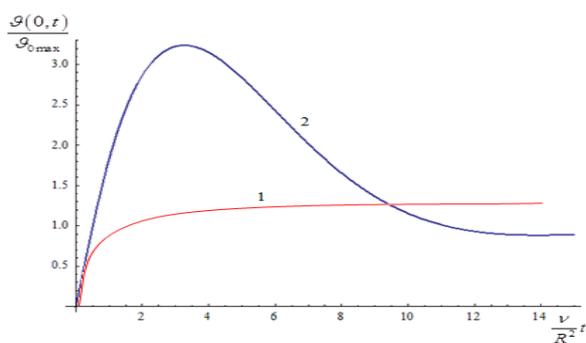
Расчеты по модели Максвелла велись по формуле (9). Одно из свойств течения упруговязкой жидкости – это достижение максимальных значений скорости на начальной стадии процесса, затем переход к этапу монотонного снижения и стационарному течению. Прослеживаются колебательные изменения скорости, расхода жидкости и других гидродинамических величин. Как и в моделях Шульмана-Хусида формула (9), по модели Максвелла анализирован процесс перехода упруговязкой жидкости в плоских каналах из нестационарного состояния в стационарное.



**Рис. 2.** Изменение отношения максимальной нестационарной скорости упруговязкой жидкости к максимальной скорости в стационарном состоянии в зависимости от времени (1 – для ньютоновской жидкости; 2 – для жидкости Максвелла при  $EL=1$ ; 3 – для жидкости Шульмана-Хусида при  $EL=1, \alpha=2, \xi(2) \approx 1.7$ )

В рис. 2 показан процесс перехода упруговязкой жидкости в стационарное состояние на основе моделей Ньютона, Максвелла и Шульмана-Хусида. Из рисунка видно, что переход упруговязкой жидкости из состояния покоя в стационарное состояние на основе моделей Максвелла и Шульмана-Хусида, в отличие от ньютоновской жидкости, проявляется в графиках волнообразным видом. Можно увидеть, что время перехода в жидкости Максвелла в несколько раз больше по сравнению с временем перехода ньютоновской жидкости и жидкости Шульмана-Хусида.

В данной главе рассмотрено также нестационарное течение упруговязкой жидкости в цилиндрической трубе в рамках упрощенных уравнений. Для системы уравнений сформулированы начальные и граничные условия. В соответствии с начальными и граничными условиями уравнения движения упруговязких жидкостей решены на основе преобразования Лапласа-Карсона. В рис. 3 приведены графические результаты для жидкостей Шульмана-Хусида и Ньютона.



**Рис. 3.** Изменение значений максимальной поперечной скорости в нестационарном состоянии течения упруговязкой жидкости по отношению к максимальному горизонтальному значению скорости в потоке ньютоновской жидкости (1 — для ньютоновской жидкости; 2 — для жидкости Шульмана-Хусида при  $EL = 1, \alpha = 2$ )

Из рисунка видно, что монотонно возрастающая горизонтальная скорость жидкости в начальной стадии, достигает самого большого значения, которое в 3-3,5 раза больше, чем максимальное значение скорости ньютоновской жидкости. Затем скорость начинает снижаться в колебательном режиме и, наконец, устремляется к значению, которое имели для ньютоновской жидкости. Усиление данного явления проявляется при возрастающем значении коэффициента упругости жидкости.

В этой главе исследованы также процессы перехода упруговязких жидкостей из стационарного состояния к состоянию покоя после снятия градиента давления в плоских каналах, то есть в результате остановки рабочего процесса. При этом показано кардинальное различие нестационарного движения упруговязких жидкостей от состояния в Ньютоновских жидкостях. Показано, что если переход в стационарный режим ньютоновской жидкости происходит в монотонно убывающем режиме, то в вязкоупругих жидкостях прослеживается упруговозвратное течение в обратном направлении, которое не наблюдается в Ньютоновской жидкости. После снятия градиента давления наблюдается резкое снижение значений всех гидродинамических параметров, в том числе уменьшение показателей скорости, расхода жидкости и других гидродинамических величин в 1,5-2 раза по сравнению с показателями ньютоновской жидкости в стационарном состоянии и образование обратного движения.

В третьей главе диссертации под названием **“Пульсирующие течения упруговязких жидкостей в плоских каналах и круглых цилиндрических трубах”** решены и изучены задачи о стационарном пульсирующем течении в плоских каналах, находящихся под воздействием периодически изменяющегося градиента давления. При этом изменение градиента давления по времени представлено в синусоидальном виде:

$$(-\partial p / \partial x) = (-\partial p / \partial x)_0 (1 + \Lambda \cos \omega t), \quad (10)$$

здесь  $\Lambda$  — относительная амплитуда колебаний;  $\omega$  — частота колебаний;  $(-\partial p / \partial x)_0$  — градиент давления в безколебательном стационарном течении.

При формировании задачи расстояние между стенками плоского канала принимается как  $2h$ , а его длина — как  $L$ . Здесь  $L$  принимается достаточно большой и обеспечивается выполнение условия  $h/L \ll 1$ . В таких случаях поток стабилизируется и поперечная скорость потока будет достаточно мала и приравнивается она к нулю. Упрощенная система дифференциальных уравнений пульсирующего движения упруговязкой

жидкости принимаются согласно материалам первой главы. Граничные условия сформулированы с учетом симметричности потока относительно горизонтальной оси. При этом согласно градиенту давления решение состоит из двух частей: постоянная часть градиента давления соответствует стационарному течению, а переменная часть градиента давления образует пульсирующее течение жидкости. Поэтому поиск решения системы уравнений осуществлялся в виде суммы двух функций продольных скоростей.

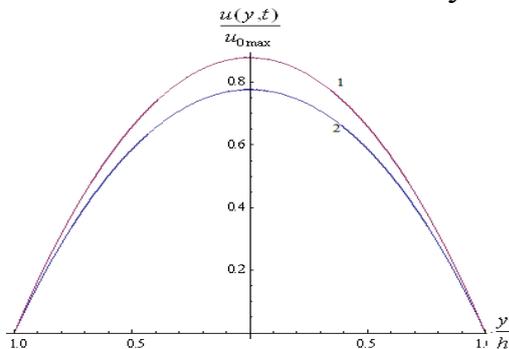
Из полученного решения в частном порядке выведена формула, определяющая закон распределения продольной скорости в пульсирующем течении ньютоновской жидкости. Для получения расчетной формулы, распределения скорости в пульсирующих жидкостях выделена действительная часть решения по продольной скорости:

$$u(y,t)/u_{0\max} = (1 - y^2/h^2) + 2\Lambda W. \quad (11).$$

здесь: первый член справа  $(1 - y^2/h^2)$  – стационарная составляющая скорости, а второй член  $\Lambda W$  – составляющая пульсирующего течения, полученная путем деления действительной и мнимой части выражения  $W$ :

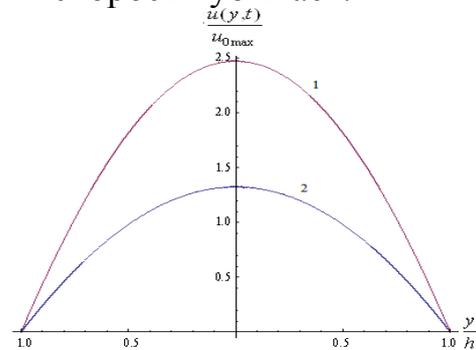
$$2W = 2 \frac{\sin \omega t}{\alpha_0^2} - \frac{2}{\alpha_0^2 (\bar{A}^2 + \bar{B}^2)} \left[ (\bar{A} \cos M_1 \bar{y} \operatorname{ch} \bar{M}_1 \bar{y} - \bar{B} \sin M_1 \bar{y} \operatorname{sh} \bar{M}_1 \bar{y}) \times \right. \\ \left. \times \cos \omega t + (\bar{B} \cos M_1 \bar{y} \operatorname{ch} \bar{M}_1 \bar{y} + \bar{A} \sin M_1 \bar{y} \operatorname{sh} \bar{M}_1 \bar{y}) \sin \omega t \right]. \quad (12)$$

Значения постоянных коэффициентов  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $M_1$ ,  $\bar{M}_1$  определены для вязкоупругих и Ньютоновских жидкостей. Приведены результаты численных расчетов по формуле (12), полученных для распределения скорости. При этом показано различие пульсирующего течения упруговязкой жидкости от течения ньютоновской жидкости в зависимости от значения числа упругости  $EL$ . На рис. 4 приведены распределения горизонтальной скорости в двух значениях частоты колебаний в пульсирующем течении Ньютоновской жидкости по поперечному сечению канала при  $\omega t = 0$ . Из рисунка видно, что при возрастающих значениях частоты колебаний амплитуда колебаний скорости убывает.



**Рис. 4.** Распределение продольной составляющей скорости Ньютоновской жидкости по сечению плоского канала в пульсирующем течении при  $\omega t = 0$ .

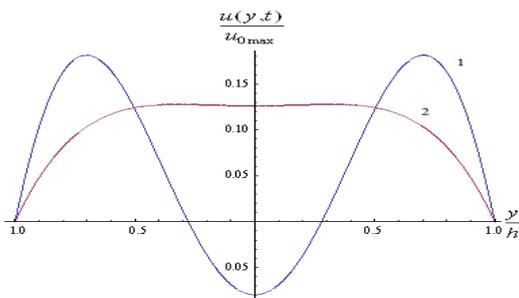
1 –  $EL = 0$ ,  $\alpha_0 = 0,01$ ; 2 –  $EL = 0$ ,  $\alpha_0 = 1$



**Рис. 5.** Распределение продольной составляющей скорости упруговязкой жидкости по сечению плоского канала в пульсирующем течении при  $\omega t = 0$ .

1 –  $EL = 3$ ,  $\alpha_0 = 1$ ,  $\alpha = 2$ ; 2 –  $EL = 1$ ,  $\alpha_0 = 1$ ,  $\alpha = 2$

В пульсирующем течении упруговязкой жидкости при близких к единице значениях коэффициента упругости происходит противоположное состояние, то есть даже при меньших единицы значениях частоты колебаний амплитуда колебаний скорости возрастает. Такое состояние показано на рис. 5. Однако, при  $EL \geq 2$  в упруговязкой жидкости наблюдается возникновение  $M$ -образного распределения скорости при небольших положительных значениях колебаний по сравнению с распределениями скорости в Ньютонских вязких жидкостях (рис. 6).



**Рис. 6.** Распределение продольной составляющей скорости по поперечному сечению плоского канала в пульсирующем течении при  $\omega t = 0$ . 1 - упруговязкая жидкость  $EL=1, \alpha_0 = 2,5, \alpha = 2$ ; 2 - Ньютонская жидкость  $EL = 0, \alpha_0 = 2,5$

Возникновение такого состояния объясняется появлением  $M$ -образного профиля распределения скоростей в пульсирующем течении. Характерная особенность гидравлического сопротивления (импеданса) в течении ньютоновской жидкости и в течении упруговязкой жидкости заключается в том, что в зависимости от изменения гидравлического сопротивления устанавливается увеличение или снижение расхода жидкости в потоке. Обычно, гидравлическое сопротивление определяется соотношением градиента давления к расходу жидкости:

$$Z = \frac{(-\partial p / \partial x)}{Q} = \left( \frac{1}{i\alpha_0^2} \left( 1 - \frac{\sin(M_1 - i\bar{M}_1)}{(M_1 - i\bar{M}_1) \cos(M_1 - i\bar{M}_1)} \right) \right)^{-1} = \bar{R} + \bar{L}i. \quad (13)$$

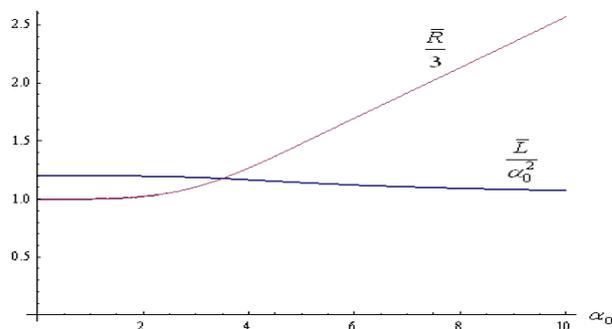
Формулу разделим на действительную часть  $\bar{R}$ , которая определяет гидравлическое сопротивление, и мнимую часть  $\bar{L}$ , соответствующей индуктивности.

Несмотря на то, что имеются многочисленные результаты исследований по импедансу Ньютонской жидкости, он впервые исследуется для упруговязкой жидкости. Выполнив численные расчеты с помощью приведенной выше формулы (13) для импеданса, изучено изменение гидравлического сопротивления и индуктивности в зависимости от частоты колебаний для пульсирующих потоков Ньютонской и упруговязкой жидкостей. Результаты исследований приведены на рис. 7 и 8.

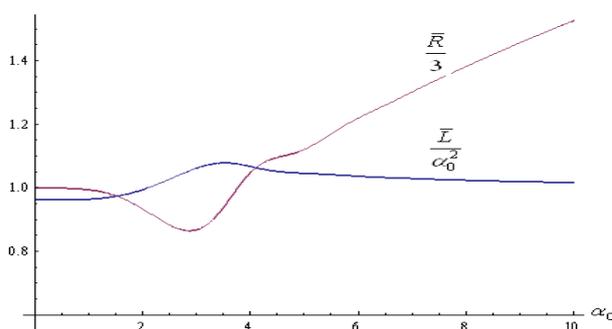
Из рисунков видно, что с возрастанием значений частоты колебаний в ньютоновской жидкости возрастает и гидравлическое сопротивление, а индуктивность снижается очень мало и стремится к единичному значению.

При значениях коэффициента упругости выше 0.01 изменение гидравлического сопротивления и индуктивности в пульсирующих потоках жидкостей начинает отличаться от Ньютонской жидкости. При увеличении коэффициента упругости в упруговязких жидкостях гидравлическое

сопротивление заметно снижается по сравнению с Ньютонской жидкостью. При последующем увеличении коэффициента упругости наблюдается резкое снижение гидравлического сопротивления и максимальное снижение его происходит в промежутке значений частоты колебаний  $2 \leq \alpha_0 \leq 4$ .



**Рис. 7.** Изменение гидравлического сопротивления  $\bar{R}$  и индуктивности  $\bar{L}$  в зависимости от параметра частоты колебаний  $\alpha_0$  при коэффициенте упругости  $EL = 0$



**Рис. 8.** Изменение гидравлического сопротивления  $\bar{R}$  и индуктивности  $\bar{L}$  в зависимости от параметра частоты колебаний  $\alpha_0$  при значениях коэффициента упругости  $EL = 0,1$ ,  $\alpha = 2$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационной работы на тему “Нестационарные и пульсирующие течения упруговязких жидкостей в трубопроводах” представлены следующие выводы:

1. На основе модели Шульмана-Хусида, которая обобщает моделей упруговязких жидкостей типа Максвелла, и уравнений движения жидкостей в “напряжениях” формированы дифференциальные уравнения движения упруговязких жидкостей.

2. Путем перехода к безразмерным величинам и исключения малых членов уравнений разработана методика упрощения и линеаризации дифференциальных уравнений упруговязких жидкостей. В результате возникла возможность сформулировать и решить ряд внутренних задач гидродинамики на основе этих уравнений. Для конкретных случаев сформулированы начальные и граничные условия для задач о нестационарном и пульсирующем течениях упруговязких жидкостей в каналах и цилиндрических трубах.

3. С применением преобразования Лапласа-Карсона решены задачи о нестационарных течениях упруговязких жидкостей для в плоскопараллельных и осесимметричных каналов. Получены решения задач о движении упруговязких жидкостей при мгновенном наложении постоянного градиента давления, отличного от нуля, и мгновенного его

снятия. На основе анализа результатов решений доказано, что в переходных процессах средняя скорость движения упруговязкой жидкости в плоских каналах будет в два-три раза больше по сравнению со скоростью движения Ньютоновских жидкостях, а при снятии градиента давления в потоке жидкости появляется обратное течение и замедление скорости в два-три раза быстрее по сравнению со случаем в ньютоновской жидкости.

4. С использованием комплексного ряда Фурье решены задачи о течениях упруговязкой жидкости в плоских каналах под воздействием пульсирующего и осциллирующего градиента давления. Результаты анализа решения дали возможность анализировать предельные режимы течения в зависимости от числа колебаний Рейнольдса  $Re_{\omega}$ , параметра упругости  $EL$  и определения интервала возникновения  $M$ -образного профиля продольной скорости.

5. Изучение влияния частоты колебания на гидравлическое сопротивление и индуктивности позволило выявить заметное снижение гидравлического сопротивления упруговязкой жидкости относительно Ньютоновской жидкости при возрастании коэффициента упругости упруговязкой жидкости. При малых значениях частоты колебаний индуктивность меняется медленно и в дальнейшем стремится к единичному значению. Определено резкое снижение гидравлического сопротивления при последующем возрастании коэффициента упругости, если частота колебаний находится в промежутке  $2 < \alpha_0 < 4$ .

6. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении государственных фундаментальных грантов. Результаты работы внедрены в работе сетей Министерства жилищно-коммунального обслуживания Республики Узбекистан для отвода сточных вод при помощи насосных механизмов. В результате изучения движения сточных вод в трубах разработаны новые методы снижения гидравлического сопротивления. При этом появляется возможность повышения производительности работы насосных механизмов при использовании эффективных методов гашения колебаний в потоке на 10-15%.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc. 02/30.12.2019.T/FM.61.01 AWARDING THE  
SCIENTIFIC DEGREE AT THE INSTITUTE OF MECHANICS AND  
SEISMIC STABILITY OF STRUCTURES**

---

**URGENCH STATE UNIVERSITY**

**SHUKUROV ZOVID KUCHKAROVICH**

**NONSTATIONARY AND PULSATING FLOWS OF VISCOELASTIC  
LIQUIDS IN PIPELINES**

**01.02.05 – Mechanics of liquid and gas**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)  
ON PHYSIC AND MATHEMATIC SCIENCES**

**Urgench – 2021**

**The theme of doctor of philosophy (PhD) was registred at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of thr Republic of Uzbekistan, under number B2018.1.PhD/FM174.**

The dissertation has been prepared the Urgench state University.

The absteract of the dissertation in posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific Council ([www.instmech.uz](http://www.instmech.uz)) and on the information-educational portal "ZiyoNet" at the address ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Scintific consutant:**

**Navruzov Kuralbay**  
Doctor of Physical and Mathematical  
Sciences, Professor

**Official opponents:**

**Bazarov Dilshod Raimovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Matkarimov San'at Yusubovich**  
Candidate of Physical and Mathematical  
Sciences, Associate Professor

**Leading organization:**

**Reserch Institute of Irrigation and Water  
Probiems**

Defense will take place «14» july 2021 at 10<sup>00</sup> at the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.T/FM.61.01 at the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (Address 100125, Tashkent, Durman yuli street, 33, Conference hall – 1. Tel: (99871) 262-71-52; fax: (99871) 262-71-32, e-mail:instmech@academy.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource center of the Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures (registration number 7). (Address: 100125, Tashkent, st. Durmon Yuli, 33. Tel. (99871) 262-71-52).

Abstract of the dissertation sent out on “28” june 2021 year.  
(mailing report №.3 on “28” june 2021 year)

**M.M.Mirsaidov**

Chairman of Scientific Council for awarding egrades,  
doctor of technical sciences, professor, Academician  
of Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan

**M.K.Usarov**

Scientific secretary of Scientific Council  
for awarding degrees, doctor of Physical and  
mathematical sciences, Senior Researcher

**Z.M.Malikov**

Chairman of the council seminar at the Scientific Council for  
the awarding degrees, Doctor of Technical Sciences

## INTRODUCTION (abstract of PhD. thesis)

**The aim of the study** is to improve rheological models of viscoelastic fluids in the form of the Shulman-Husid modification, substantiate the advantage of this model over Newton and Maxwell models, study the issues of unsteady and pulsating flows of viscoelastic fluids in flat channels and cylindrical pipes.

**The objects of the study** is mathematical models of non-stationary, pulsating and oscillating flows of elastic-viscous liquids in flat channels and cylindrical pipes.

**Scientific novelty of the dissertation research** is as follows:

on the basis of generalized rheological models, the basic differential equations of motion of an elastic-viscous fluid are formed and simplified versions of the solution of problems of supply through pipes are proposed;

improved methods for solving problems of motion of unsteady, pulsating and oscillating flows of viscoelastic fluids in flat channels and cylindrical pipes;

as a result of the analysis of new solutions to the set tasks, the intervals of parameters of viscoelastic fluids are determined;

new hydrodynamic laws of the processes of “elastic lifting” and “elastic return” of flows of non-Newtonian fluids have been determined.

created new hydrodynamic laws by comparing the laws of change with the regularities of the flow of the Newtonian fluid model depending on the parameter of the oscillation frequency of the hydraulic resistance in the pulsating and oscillating flows of viscoelastic fluids.

**Implementation of research results.** On the basis of research in modeling the pulsating movement of blood in arterial vessels and solving similar problems, taking into account the similarity of blood properties with the properties of viscoelastic materials, the fundamental project No. F-4-42 "Biomechanics of the heart and its application" was used (reference No. 89-03-1661 Of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan dated April 29, 2019 and certificates of the Khorezm and Samarkand regional branches of the Republican Scientific Center for Emergency Medical Aid of the Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan.

As a result, it became possible to determine hydraulic resistances in arterial vessels based on the laws of distribution and extinction of pulsating waves obtained using a program for mathematical modeling of the arterial system;

The results were introduced by the Samarkand Regional State Unitary Enterprise "Suvokava" of the Samarkand Regional Department of Housing and Communal Services of the Ministry of Housing and Communal Services of the Republic of Uzbekistan (in the appendices of the thesis).

Introduced in the management of water supply to the districts and its distribution through pipes by the Zarafshan Basin Administration of Irrigation Systems of the Samarkand Region and the Urgench Regional Amu Darya Left Bank Basin Administration of Irrigation Systems. (given in the appendices of the thesis). It was determined that as a result of damping oscillations in the process of starting and shutting down pumping equipment, accepting wastewater as non-

Newtonian liquids, the production efficiency of pumping equipment increased by 10-15 percent.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 124 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I-бўлим (I часть; I part)**

1. Наврузов К., Шукуров З., Ражабов С. Импедансный метод определения гидравлического сопротивления в крупных артериальных сосудах с проницаемыми стенками // “Илм сарчашмалари”, Урганч. 2017.- №4.- С. 19-24. (01.00.00; №12).

2. Нарузов К., Шукуров З., Ражабов С. О пульсирующем течении в крупных артериальных сосудах с учетом упруго проницаемости стенки // “Илм сарчашмалари”, Урганч. 2017.-№11.- С. 31-37. (01.00.00; №12).

3. Navruzov K., Shukurov Z., Rajabov S., Begjanov A., Babajanova Y. On the reduction of the resistance in the central arterial // Asian Journal of Research №12 (12)2017. – pp. 20-31. (№35 CrossRef. Impact factor: 4.1).

4. Нарузов К., Шукуров З., Ражабов С. Импедансный метод определения гидравлического сопротивления в крупных артериальных сосудах с проницаемыми стенками // Узбекский журнал «Проблемы механики», №4, 2017. – С. 28-32. (01.00.00; №4).

5. Shukurov Z. Pulsating flows of a viscous fluid in a flat channel with variable walls // Asian Journal of Research №3, 2019. – pp. 169-174. (№35 CrossRef. Impact factor: 5.1).

6. Navruzov Kuralbay, Shukurov Zoxid Kuchkarovich, Begjanov Amirbek Shixnazarovich. Method for determining hydraulic resistance during fluid flow in pipes // Electronic journal of actual problems of modern science, education and training 2019-II Issn 2181-9750. UDC: 532.542. – pp. 1-8. (Электрон илмий тўплам №10).

7. Shukurov Zoxid Kuchkarovich. General rheological model of Maxwell-type elastic valuable fluids // European Journal of Molecular & Clinical Medicine. ISSN 2515-8260 Volume 07, Issue 05, 2020. – pp. 1716-1721. (01.00.00 (№3. Scopus. №35 CrossRef)).

**II-бўлим (II часть; II part)**

1. Abdukarimov F., Navruzov K., Shukurov Z., Rajabov S. Impedant method for determining the reduction of hydraulic resistance in large arterial vessels with permeable walls // Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering. 2018; 5(2): pp. 79-82.

2. Шукуров З., Ражабов С. Пульсирующие течения жидкости в трубах с проницаемыми стенками // Science, research, development 13 Techics and technology Berlin-2019. В.С.94, Z40, (30.01.2019)-Warszawa, 2019.

3. Шукуров Зоҳид Кучкорович. Нестационарное течение вязкоупругой жидкости в плоском канале при наличии перепада давления // Publishing House "Education and Science". Praha, Czech Republic 2021.

Автореферат «IRRIGATSIYA VA MELIORATSIYA» илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус, инглиз (резюме) тилларидаги матнлари мослиги текширилди (19.05.2021 й.).

Босишга рухсат этилди: 23.06. 2021 йил  
Бичими 60×84  $\frac{1}{16}$ , «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма тобоғи 2,8. Адади: 100. Буюртма № 71.  
Тел (99) 832 99 79; (97) 815 44 54.  
Гувоҳнома reestr № 10-3279  
“IMPRESS MEDIA” МЧЖ босмахонасида чоп этилган.  
100031, Тошкент ш., Яккасарой тумани, Кушбеги кўчаси, 6-уй.