

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI  
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.03/2025.27.12.FM/T.09.03 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT  
UNIVERSITETI**

**ABDIKARIMOV NABIJON IBADULLAYEVICH**

**DEVORI DEFORMATSIYALANUVCHI QUVUR VA KANALLARDA  
ELASTIK QOVUSHOQ SUYUQLIKNING PULSLI OQIMINI TADQIQ  
QILISH**

**01.02.05 – Suyuqlik va gaz mexanikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Samarqand – 2026**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
avtoreferati mundarijasi**

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

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

**Abdikarimov Nabijon Ibadullayevich**

Devori deformatsiyalanuvchi quvur va kanallarda elastik qovushoq suyuqlikning  
pulslı oqimini tadqiq qilish.....3

**Абдикаримов Набижон Ибадуллаевич**

Исследование пульсового течения вязкоупругой жидкости в трубах и каналах  
с деформируемой стенкой.....22

**Abdikarimov Nabijon Ibadullayevich**

Studies on the pulsatile flow of viscoelastic fluids in pipes and channels with  
deformable walls.....41

**E'lon qilingan ishlar ro'uxati**

**Список опубликованных работ**

List of published works.....45

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI  
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.03/2025.27.12.FM/T.09.03 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI URGANCH DAVLAT  
UNIVERSITETI**

**ABDIKARIMOV NABIJON IBADULLAYEVICH**

**DEVORI DEFORMATSIYALANUVCHI QUVUR VA KANALLARDA  
ELASTIK QOVUSHOQ SUYUQLIKNING PULSLI OQIMINI TADQIQ  
QILISH**

**01.02.05 – Suyuqlik va gaz mexanikasi**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PHD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Samarqand – 2026**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/FM1078 raqam bilan ro‘yxatga olingan.**

Dissertatsiya Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida ([www.samdu.uz](http://www.samdu.uz)) va “Ziyonet” axborot ta’lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar**

**Navruzov Kuralbay**

fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Maxmudov Jamol Maxmud o‘g‘li**

fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

**Xoliyarov Erkin Chorshanbiyevich**

fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

**Yetakchi tashkilot**

**O‘zR FA M.T. O‘rozboyev nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti**

Dissertatsiya himoyasi Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti huzuridagi DSc.03/2025.27.12.FM/T.09.03 raqamli Ilmiy kengashning «17» aprel 2026-yil soat 15-00 dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 140104, Samarqand sh., Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (+99866) 239-11-40, faks: faks: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: [devonxona@samdu.uz](mailto:devonxona@samdu.uz)).

Dissertatsiya bilan Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (108-raqami bilan ro‘yxatga olingan). Manzil: 140104, Samarqand sh., Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (+99866) 239-17-25.

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.

(2026-yil « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ dagi \_\_\_\_\_ raqamli reestr bayonnomasi)



*[Handwritten signatures in blue ink]*

**R.I. Xalmuradov**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi,  
texnika fanlari doktori, professor

**O‘.A. Nishonov**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash  
ilmiy kotibi, fizika-matematika fanlari  
bo‘yicha falsafa doktori (PhD)

**B.X. Xo‘jayorov**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash  
qoshidagi ilmiy seminar raisi, fizika-  
matematika fanlari doktori, professor

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda sanoatning turli tarmoqlarida, xususan, neft-gaz, kimyo, oziq-ovqat va gidrotexnika sohalarida qo'llanilayotgan texnologik jarayonlarni takomillashtirish muhandislik oldiga dolzarb gidromexanik masalalarni yechishni taqozo qilmoqda. Shunday masalalar qatoriga deformatsiyalanuvchi devorli kanal va quvurlarda nonyuton suyuqliklarining pulsi oqimlarini modellashtirish, energiya tejovchi texnologiyalarni ishlab chiqish va suyuqlik sarfini optimal taqsimlash haqidagi masalalar kiradi. Ko'pgina rivojlangan mamlakatlarda, masalan Yaponiya, AQSh, Xitoy, Rossiya va Germaniya kabi davlatlarda, gidrotexnik inshootlar va texnologik tizimlarda suyuqliklarning reologik xususiyatlarini hisobga olgan holda oqim dinamikasini hisoblashga, tizimlarning samaradorligini oshirishga hamda yangi matematik modellarini ishlab chiqishga katta e'tibor qaratilmoqda.

Dunyoda, bugungi kunda, murakkab tarkibli muhitlarni tashishda qo'llaniladigan quvur o'tkazgichlarning, jumladan elastik va plastik xossaga ega bo'lgan silindrik quvurlarning pulsi bosim ostidagi chidamliligini ta'minlash hamda ulardagi oqim jarayonlarini sonli tahlil qilishga bag'ishlangan ko'plab ilmiy tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Shuning uchun, zamonaviy fan va texnikaning turli sohaları tomonidan, suyuqlikning relaksatsiya va qovushoqlik xususiyatlarini e'tiborga olib, devori deformatsiyalanuvchi quvurlarda nonyuton suyuqlik oqimining takomillashtirilgan matematik modellarini yaratish va gidrodinamik jarayonlarni optimallashtirish bo'yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Tadqiqotchilarning asosiy maqsadi energiya samaradorligini oshirish va transport xarajatlarini kamaytirishga yo'naltirilgan. Shu bilan birga, polimer eritmalar, burg'ulash suyuqliklari va fiziologik suyuqliklarning (qon, so'lak) murakkab oqimlarini tadqiq qilishga, ayniqsa pulsatsiyalanuvchi oqimlardagi noqulay tebranishlarni so'ndirish mexanizmlarini tahlil qilishga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda xalq xo'jaligining turli sohalarida, xususan qishloq xo'jaligida ekinlarni tomchilatib va egatlab sug'orish tizimlarini takomillashtirish, kompozit materiallardan tayyorlangan quvurlarda suyuqlik harakatini hisoblashning matematik modellarini yaratish va amaliyotga tadbiiq etish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022–2026-yillarda Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan, "Yirik ishlab chiqarish korxonalarida quvvatlarni modernizatsiya va rekonstruksiya qilish orqali energiyani tejash va samaradorlikni oshirish bo'yicha texnik siyosatni ishlab chiqish" bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Qo'yilgan ushbu masalalarni yechishda, xususan, gidrotexnika inshootlarining chidamliligini oshirish, nonyuton suyuqliklarining reologik xossalarini va quvur devorlarining deformatsiyasini hisobga olish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "Yangi O'zbekistonning 2022–2026-yillarga mo'ljallangan taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmoni, 2022-yil 6-iyuldagi PF-165-son "2022–2026-yillarda O'zbekiston Respublikasining innovatsion rivojlanish strategiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi Farmoni hamda mazkur faoliyat sohasiga tegishli boshqa

<sup>1</sup>me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining IV. «Matematika, mexanika va informatika» ustuvor yo'nalishi doirasida bajarilgan.

### **Muammoning o'rganilganlik darajasi.**

Hozirgi vaqtda devori deformatsiyalanuvchi quvur va kanallarda elastik qovushoq suyuqliklarning pulslil oqimini devori deformatsiyasini va suyuqlikning murakkab reologik xususiyatlarini e'tiborga olgan holda, matematik modelini yaratish, hisoblash algoritmlarini tuzish va takomillashtirish bo'yicha ilmiy tadqiqot ishlari jahonning yetakchi ilmiy markazlari va oliy ta'lim muassasalarida, jumladan, Xalqaro reologiya jamiyatida (The Society of Rheology, SR), Massachusetts texnologiya institutida (Massachusetts Institute of Technology) (AQSH), Britaniya reologik jamiyatida (British Society of Rheology, ESR), Oksford universitetida (University of Oxford), Kembridj universitetida (Cambridge University), Manchester universitetida (University of Manchester) (Buyuk Britaniya), Germaniya reologiya jamiyatida (German Rheological Society, DRG) (Germaniya), Hindiston reologiya jamiyatida (Indian Society of Rheology, ISR), Avstraliya reologiya jamiyatida (Australian Society of Rheology, ASR), Rossiya reologiya jamiyati, M.V.Lomonosov nomidagi Moskva davlat universitetida (RF), O'zR FA Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi institutida (O'zbekiston) olib borilmoqda va bu yo'nalishda katta ilmiy natijalarga erishilmoqda.

Siqilmaydigan muhitga bog'liq bo'lgan tadqiqot ishlari ilk marotaba I.S.Gromekaning ilmiy tadqiqot ishida elastik quvurlarda suyuqliklarning to'liqinsimon oqimi bir o'lchovli qo'yilishida o'rganilgan bo'lsa, keyinchalik kanal va silindrik quvurlarda Nyuton va nonyuton suyuqliklarning nostatsionar, tebranma laminar va turbulent oqimlari U.L.Ulkinson, K.Trusdell, Dj.Astarita, Dj.Marruchchi, Dj.F.Richardson, P.M.Ogibalov, A.X.Mirzadjanzade, Z.P.Shulman, B.M.Xusidlarning ilmiy tadqiqot ishlarida rivojlantirilgan. Bu sohada hozirgi davrda xorij olimlaridan A.I. Ageev, E.I.Mogilevskiy, Z.Ding, R.Bali, N.Gupta, Ye.P.Valuyeva, L.L.Ferras, J.M.Nobrega, L.Fusi, Z.Sheidaei, R.P.Chobra va boshqalar tomonidan ilmiy tadqiqot ishlar olib borilmoqda. O'zbekistonlik olimlardan esa J.F.Fayzullayev, J.A.Akilov, B.X.Xo'jayorov, K.Sh.Latipov, O.I.Umarov, K.Navruzov, Z.M.Malikov, S.I.Xudaykulov va boshqalar ilmiy tadqiqot ishlari olib borib, ijobiy natijalarga erishib kelmoqda.

Ammo devori deformatsiyalanuvchi quvur va kanallarda Nyuton suyuqliklar harakatini o'rganish masalalari bo'yicha ko'plab tadqiqotlar olib borilganiga qaramasdan, hozirgi kunda devori deformatsiyalanuvchi quvur va kanallarda elastik qovushoq suyuqliklarning pulslil oqimi masalalari yetarli darajada tadqiq qilinmagan va amaliyotga to'laqonli tatbiq etilmagan.

---

<sup>1</sup>O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son «Yangi O'zbekistonning 2022-2026 yillarga mo'ljallangan rivojlanish strategiyasi to'g'risida»gi Farmoni.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya ishi Urganch davlat universiteti "Amaliy matematika" kafedrasida ilmiy-tadqiqotlar rejasiga mos holda OT-F4-04(05) "Material noxiziqli evolyutsion tenglamalarni yechishni spektral usulini qo'llash. Yurak tomir sistemasi biomexanikasi" (2017-2020 yy.) mavzusidagi ilmiy-tadqiqot loyihasi doirasida va "Matematik injiniring" kafedrasida "Nonyuton suyuqliklar mexanikasi tadqiqotlari" ilmiy rejasi asosida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi.** Devori deformatsiyalanuvchi kanal va silindrik quvurlarda nonyuton suyuqliklarning modellaridan foydalangan holda elastik qovushoq suyuqliklarning pulsi oqimlarini kontakt masalalar asosida shakllantirish va ularni analitik usulda yechishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

devori deformatsiyalanuvchi kanal va silindrik quvurlarda elastik qovushoq suyuqlikning pulsi oqimlarini kontakt masalalari ko'rinishida yechishda, devor deformatsiyasi differentsial tenglamalari bilan elastik qovushoq suyuqliklarning harakati differentsial tenglamalarini birgalikda sistema ko'rinishida shakllantirish;

shakllantirilgan kontakt masalalarini analitik usulda yechish orqali suyuqlik tezliklari, suyuqlik sarfi va uzatma funksiyasining o'zgarishni aniqlash uchun formulalar keltirib chiqarish;

keltirilib chiqarilgan formulalar asosida kanal va silindrik quvurlarda elastik qovushoq suyuqliklarning pulsi oqimlarida suyuqliklarning elastik xususiyatini inobatga olgan holda gidrodinamik qarshilikning tebranishlar chastatasiga bog'liq ravishda o'zgarishini tadqiq qilish;

elastik qovushoq suyuqlik reologik xarakteristikalarining kanal va silindrik quvur devorlarida elastik qovushoq suyuqliklarning pulsi oqimlarida hosil bo'ladigan puls to'lqining tarqalish tezligi va uning so'nish dekrementlariga ta'sirini o'rganishdan iborat.

**Tadqiqotning ob'ekti** sifatida devori deformatsiyalanuvchi kanallarda va silindrik quvurlarda elastik qovushoq suyuqlikning pulsi oqimlari qaraladi.

**Tadqiqotning predmetini** devori deformatsiyalanuvchi quvurlarda elastik qovushoq suyuqliklarning pulsi oqimlarining matematik modellari tashkil etadi.

**Tadqiqotning usullari** devori deformatsiyalanuvchi quvurlarda elastik qovushoq siqilmaydigan suyuqlikning tebranuvchan oqimlar masalalarini yechishda matematik fizika tenglamalarini yechish usullaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

bir jinsli bo'lmagan holat uchun klassik tipdagi elastik qovushoq suyuqliklarning takomillashtirilgan reologik modellari ishlab chiqilgan hamda ular asosida suyuqlik harakatining asosiy differentsial tenglamalari shakllantirilib, quvurlar orqali elastik qovushoq suyuqliklarni uzatish masalalarini yechishning soddalashtirilgan variantlari ishlab chiqilgan;

devori deformatsiyalanuvchi kanal va silindrik quvurlarda elastik qovushoq suyuqlikning pulsi oqimlariga oid yangi masalalar tegishli chegaraviy shartlar asosida shakllantirilgan hamda ularning analitik yechimlari yordamida tezliklar

taqsimoti, suyuqlik sarfi va uzatma funksiyasining o'zgarishini aniqlash imkonini beruvchi hisob formulalari keltirib chiqarilgan;

elastik qovushoq suyuqliklarning pulсли oqimlarida gidrodinamik qarshilikning tebranishlar chastotasiga bog'liq ravishda o'zgarishi aniqlangan bo'lib, bunda suyuqlikning elastik xususiyati hisobiga qarshilikning ma'lum (ikki va to'rt sonlari oralig'idagi) qiymatlarda kamayishi ilmiy jihatdan isbotlangan;

kanal va silindrik quvurlarning deformatsiyalanuvchi devorlari bo'ylab tarqaladigan puls to'lqinlarining tezligi va ularning so'nish dekrementlari elastik qovushoq suyuqlikning reologik xarakteristikalari ta'siri ostida o'zgarishi qonuniyatlari aniqlangan;

deformatsiyalanuvchi quvurlarda devor puls to'lqinining tarqalish tezligini o'lchash orqali quvur devorining elastiklik koeffitsiyentini aniqlash usuli ishlab chiqilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

yirik arterial qon tomirlaridagi pulсли oqimlarni matematik modellashtirishda qonning elastik qovushoq reologik xususiyatlarini inobatga oluvchi hisoblash usullari takomillashtirilgan va ularni qo'llash imkoniyatlari asoslangan;

elastik qovushoq reologik model asosida pulsatsiyalanuvchi oqimning gidrodinamik tavsifnomalarini va bosim yo'qolishini hisoblash uchun matematik tenglamalar algoritmi ishlab chiqilgan;

arterial qon aylanish tizimida qonning elastik qovushoqlik xususiyatlarini hisobga olgan holda, pulсли oqim samaradorligini baholash va gidravlik qarshilikni optimallashtirish imkoniyati yaratilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Devori deformatsiyalanuvchi kanal va silindrik quvurlardagi elastik qovushoq suyuqlikning pulсли oqimlarini tadqiq etish natijasida olingan natijalarning ishonchliligi, xususi holda, Nyuton suyuqlik harakatiga o'tishdagi natijalar, shuningdek bu sohada tadqiqot ishlari olib borgan J.R.Uomersli va E.Laytftularning tadqiqot ishi natijalari bilan mos kelishi orqali asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqotning ilmiy ahamiyati devori deformatsiyalanuvchi kanal va silindrik quvurlarda elastik qovushoq suyuqliklarning pulсли oqim masalalarini analitik usulda yechish, xususi holda, bu yechimlarni Nyuton suyuqliklari natijalari bilan taqqoslash orqali yangi gidrodinamik qonuniyatlarni aniqlash bilan tushuntiriladi.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati, quvurlarda elastik-qovushoq suyuqliklarning tebranma harakatida puls to'lqinlarining tarqalish tezligini aniqlash orqali quvur devori elastiklik modulining qiymatini aniqlash imkoni yaratilgani bilan ifodalanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Elastik qovushoq suyuqliklarning deformatsiyalanuvchi quvurlardagi pulсли harakatlarini tadqiq etish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

arterial tomirlarda qonning pulсли harakatini modellashtirish va unga mos gidrodinamik masalalarni yechish usullari Urganch davlat universitetida 2017–2020-yillarda bajarilgan OT-F4-04(05) “Spektral usulni matritsaviy nochiziqli evolyutsion tenglamalarni yechishga tatbiqlari, yurak-qon tomir tizimining

biomexanikasi” mavzusidagi fundamental loyiha doirasida foydalanilgan (Urganch davlat universitetining 2025-yil 30-apreldagi 02-84/5-sonli ma’lumotnomasi). Natijada arterial tizimni matematik modellashtirishga doir dasturiy vosita yordamida olingan puls to’lqinlarining tarqalish va so’nish qonuniyatlari asosida arterial tomirlardagi gidrodinamik qarshiliklarni aniqlash imkonini bergan;

devori deformatsiyalanuvchi quvur va kanallarda elastik-qovushoq suyuqliklarning pulsi oqimi masalalarini yechish algoritmlari Qarshi davlat universitetida 2018–2020-yillarda bajarilgan OT-Atex-2018-340 «Ikki tezlikli muhit dinamikasining amaliy geofizik masalalarini nazariy va sonli tadqiq etish» mavzusidagi amaliy loyihada foydalanilgan (Qarshi davlat universitetining 2024-yil 9-martdagi 03/672-sonli ma’lumotnomasi). Natijada murakkab gidrodinamik tizimlardagi to’lqin jarayonlarini sonli modellashtirish hamda elastik devorli quvurlarda suyuqlik uzatish samaradorligini tahlil qilish imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiyaning asosiy mazmuni 10 ta ilmiy-amaliy konferensiyalarda, shu jumladan 6 ta xalqaro va 4 ta respublika ilmiy-amaliy konferensiyalarda muhokama qilindi.

**Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo’yicha jami 10 ta ilmiy ish chop etilgan bo’lib, jumladan O’zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa fanlari doktorlik dissertatsiyalari (PhD) asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 9 ta maqola (6 tasi respublika va 3 tasi xorijiy jurnallarda) chop qilingan.

**Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi.** Dissertatsiya kirish qismi, uchta bob, xulosa va 107 ta foydalanilgan adabiyotlar ro’yxatidan tashkil topgan. Dissertatsiyaning hajmi 110 betni tashkil qiladi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Dissertatsiyaning kirish qismida** tanlangan mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari taraqqiyotining ustuvor yo’nalishlariga mosligi ko’rsatilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari belgilab olingan, tadqiqot ob’ekti va predmeti aniqlangan, olingan natijalarning ishonchligi asoslangan, ishning yangiliklari, nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy etilganlik holati hamda nashr etilgan ishlar va dissertatsiya ishining tuzilishi bo’yicha ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Elastik qovushoq suyuqlik va devor deformatsiyasi harakati differensial tenglamalarini tuzish hamda ularni soddalashtirish usullari”** deb nomlangan birinchi bobida quvurlar devori deformatsiyasining differensial tenglamalari simmetrik ortotropik shaklda keltirilgan:

$$\begin{cases} M_1 \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial u_x}{\partial t} + k_1 u_x = -\mu \left( \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r} + \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial x} \right)_{r=R} + \frac{\partial u_r}{\partial x} \frac{T_{20} - T_{10}}{R} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial x}, \\ M_1 \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} + c_2 \frac{\partial u_r}{\partial t} + k_2 u_r = \left( P - 2\mu \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r} \right)_{r=R} + \frac{u_r}{R^2} T_{10} - \frac{\sigma_1}{R} + T_{10} \frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (1)$$

bu yerda  $T_{20}$ -aylana birligiga ta'sir qiluvchi doimiy bo'ylama kuchlanganlik;

$T_{10}$ -transmural bosim  $p$  ga mos aylanma kuchlanganlik;  $M_0$ - qattiq materialning birlik massasi;  $k_1, k_2$ - elastiklik koeffitsiyentlari;

$C_1, C_2$  - qovushoqlik koeffitsiyentining bo'ylama va radial komponentlari;  $u_x, u_r$  - bo'ylama va radial siljish komponentlari;  $t$ - vaqt;  $\eta$ - suyuqlikning dinamik qovushoqlik koeffitsiyenti;  $h$ - devor qalinligi;  $R$ - quvurning tinch holatdagi radiusi;  $\mathcal{G}_x$  va  $\mathcal{G}_r$ - suyuqlikning bo'ylama va radial tezliklari;  $\sigma_1$  va  $\sigma_2$ - devor kuchlanishi;  $T_{10} = Rp$ - shaklda Laplas qonuniga muvofiq topiladi.

Suyuqlikning harakat tenglamasi kuchlanishlar ko'rinishida keltirilgan. Elastik qovushoq suyuqlikning devori deformatsiyalanuvchi kanal va quvurlardagi harakat differentsial tenglamalari sistemasi, devor deformatsiyasi tenglamasi, suyuqlikning harakati va reologik tenglamalari birgalikda sistema qilinib hosil qilingan. Bu tenglamalar sistemasini soddalashtirishda quvur radiusining yoki kanal enining uning uzunligiga nisbati va Reynolds soni yetarlicha kichik deb hisoblangan va shu orqali tenglamalar sistemasi chiziqilashtirilgan. Qo'yilgan masalalarni yechish uchun chegaraviy shartlar kanal yoki quvur devorida bo'ylama tezlik nolga teng, ko'ndalang tezlik devor deformatsiyasi tezligiga teng deb olingan. Quvur yoki kanaldagi suyuqlik oqimi bo'ylama o'qqa nisbatan simmetrik bo'lganligi sababli, oqim markazida suyuqlikning bo'ylama tezlik gradienti nolga teng va ko'ndalang tezlikning o'zi nolga teng deb olingan.

Dissertatsiyaning "**Devorlari deformatsiyalanuvchi ikkita parallel tekislik bilan chegaralangan kanaldagi elastik qovushoq suyuqlikning pulsi oqimini tadqiq qilish**" deb nomlangan ikkinchi bobida, devorlari deformatsiyalanuvchi kanaldagi elastik qovushoq suyuqlikning pulsi harakati qaralgan. Bunda kanal enining uning uzunligiga nisbati va Reynolds sonining yetarlicha kichikligi shartida devor deformatsiyasi, harakat va reologik tenglamalari chiziqilashtirilgan. Elastik-qovushoq suyuqlik harakatining chiziqilashtirilgan tenglamalar sistemasi ushbu ko'rinishga keltirilgan:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial y} = 0, \quad \tau = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_k, \\ \lambda_k \frac{\partial \tau_k}{\partial t} + \tau_k = \eta_k \frac{\partial u}{\partial y}, \end{array} \right. \quad (2)$$

Devorning harakat tenglamasi quyidagi ko'rinishda beriladi:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{2h_0^2}{\delta E} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t}, \quad (3)$$

bu yerda  $p$ - bosim;  $u, v$ - bo'ylama va ko'ndalang tezlik;  $\rho$ - suyuqlik zichligi;  $\nu$ - kinematik qovushoqlik koeffitsiyenti;  $t$ - vaqt;  $h$ - kanal kesimi uzunligi,  $E$ - kanal devorining elastiklik koeffitsiyenti,  $p_0$ - o'rtacha o'zgarmas

tashqi bosim,  $h_0$  - kanal kesimi uzunligi o'rtacha qiymati;  $\tau$  - kuchlanish;  $\lambda_k = \frac{\lambda}{k^\alpha}$ ,  $\eta_k = \frac{\eta}{\xi(\alpha)k^\alpha}$ ,  $\xi(\alpha) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^\alpha}$ ;  $\lambda$  - relaksatsiya koeffitsiyenti;  $\eta$  - dinamik qovushoqlik koeffitsiyenti;  $\alpha$  - relaksatsiya vaqti spektri taqsimlanishini xarakterlovchi son;  $\xi(\alpha)$  - Riman dzetta funksiyasi.

Vaqt bo'yicha davriy ravishda o'zgaruvchi bosim gradientining ta'sirida bo'ladigan kanallardagi elastik qovushoq suyuqliklarning tebranma oqimi tadqiq qilingan. Kanalning kirish va chiqish qismlarida bosimning vaqt bo'yicha sinusoidal ko'rinishda o'zgarishi inobotga olingan holda bosim gradientining o'zgarishi quyidagicha aniqlangan:

$$\left(-\frac{\partial p(t)}{\partial x}\right) = \left(-\frac{\partial p_0}{\partial x}\right) + \left(-\frac{\partial p_1}{\partial x}\right)e^{i\omega t}. \quad (4)$$

Bu yerda  $\left(-\frac{\partial p_0}{\partial x}\right)$  - statsionar oqimdagi bosim gradienti;  $\left(-\frac{\partial p_1}{\partial x}\right)$  - tebranma oqimda tebranish amplitudasining o'zgarishini ifoda qiluvchi bosim gradienti;  $\omega$  - tebranish chastotasi;  $t$  - vaqt.

Bosim gradientining o'zgarishi ikkita qismdan: ya'ni birinchi qismi o'zgarmas, ikkinchi qismi esa vaqt bo'yicha o'zgaruvchi davriy funksiyadan iboratligi inobotga olingan. Shu boisdan (4) tenglamaning yechimi ikkita funksiyalar yig'indisi shaklida ifoda qilingan:

$$u = u_0(y) + u_1(y)e^{i\omega t}, \quad \tau = \tau_0(y) + \tau_1(y)e^{i\omega t}, \quad \frac{\partial p(t)}{\partial x} = \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\partial p_1}{\partial x}e^{i\omega t}. \quad (5)$$

Bu holda yechimning birinchi hadiga mos keluvchi yechimlar statsionar oqimga, ikkinchi hadining haqiqiy qismiga mos keluvchi yechimlar tebranma oqimga mos keluvchi yechimlar bo'lishligi ko'rsatilgan. Bu yerda suyuqlikning statsionar oqimi Puazel oqimidan iborat ekanligi ko'rsatilib, elastik qovushoq suyuqlikning devori deformatsiyalanuvchi kanaldagi tebranma oqimi yangi masala sifatida shakllantirilgan. Kanal devorida suyuqlik bo'ylama tezligi nolga teng deb, ko'ndalang tezlik esa devor deformatsiyasining ko'ndalang o'q bo'yicha tezligiga tengligiligi orqali ifoda qilingan. Oqim bo'ylama o'qqa nisbatan simmetrik bo'lganligi uchun, kanal markazida bo'ylama tezlik gradienti va ko'ndalang tezlikning o'zi nolga tengligidan foydalanilgan. (2) tenglamalar sistemasi (5) eksponentsial almashtirishlarni qo'yish yordamida ikkinchi tartibli o'zgarmas koeffitsiyentli birjinslimas differensial tenglama ko'rinishiga keltirilgan va uning yechimi chegaraviy shartlardan foydalangan holda quyidagi ko'rinishda aniqlangan:

$$\frac{u(x, y, t)}{u_{1 \max}^0} = 2\left(-\frac{\partial \bar{p}_1(x)}{\partial x}\right) \left[ \frac{1}{i\alpha_0^2} \left( 1 - \frac{\cos\left(i^{\frac{3}{2}}\alpha_0\left(\frac{1}{\eta^*(i\omega)}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{y}{h}\right)}{\cos\left(i^{\frac{3}{2}}\alpha_0\left(\frac{1}{\eta^*(i\omega)}\right)^{\frac{1}{2}}\right)} \right) e^{i\omega t} \right]. \quad (6)$$

Bu yerda

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{\omega}{v}} h_0, \quad \eta^*(i\omega) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^\alpha}{\xi(\alpha)(k^\alpha + \lambda i\omega)^2}, \quad v = \frac{\eta}{\rho}, \quad \left(-\frac{\partial p_1}{\partial x}\right) / \left(-\frac{\partial p_{10}}{\partial x}\right) = -\frac{\partial \bar{p}_1}{\partial x};$$

$$u_{1 \max}^0 = \frac{1}{2\eta} \left( \frac{p_1^0 - p_1^L}{L} \right) h^2 \text{ -- devori deformatsiyalanmaydigan kanalda qovushoq}$$

suyuqlikning statsionar oqimning maksimal bo‘ylama tezligi.

Bo‘ylama tezlik taqsimlanishi uchun aniqlangan (6) formulaning har ikkala tomonini  $-h$  - dan  $h$  - gacha integrallab va uni  $2h$  ga bo‘lib suyuqlikning o‘rtacha bo‘ylama tezligi uchun quyidagi formula hosil qilingan:

$$\frac{\langle u(x,t) \rangle}{\langle u_0 \rangle} = \text{real} \left( -\frac{\partial \bar{p}_1(x)}{\partial x} \right) \left[ \frac{1}{i\alpha_0^2} \left( 1 - \frac{\sin \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)}{\left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cos \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)} \right) e^{i\omega t} \right]. \quad (7)$$

Bu yerda  $\langle u_0 \rangle = \frac{1}{3\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right)_0 h^2$  - devori deformatsiyalanmaydigan kanalda

qovushoq suyuqlikning statsionar oqimidagi o‘rtacha bo‘ylama tezlik. (7) tenglamadan bosim gradienti topilgan

$$\left( -\frac{\partial \bar{p}_1(x,t)}{\partial x} \right) = \langle u_1(x,t) \rangle \bar{Z}, \quad (8)$$

bu yerda

$$\bar{Z} = \left[ \frac{1}{i\alpha_0^2} \left( 1 - \frac{\sin \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)}{\left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cos \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)} \right) \right]^{-1} \text{ deb belgilash kiritilgan.}$$

Hosil qilingan (8) tenglama ikki noma‘lumli tenglama bo‘lib, devor deformatsiyasini aniqlovchi yana bir tenglamani tuzish zarur. Devor deformatsiyasini aniqlovchi tenglama quyidagi ko‘rinishga ega:

$$\frac{\partial \langle u(x,t) \rangle}{\partial x} = \frac{2h_0}{\delta E} i\omega \bar{p}_1.$$

ushbu ikkala tenglamani sistema qilib, bosim gradientini, suyuqlikning o‘rtacha tezligini topish uchun tenglamalar sistemasi hosil qilingan:

$$\begin{cases} \frac{\partial \langle \bar{u}_1(x,t) \rangle}{\partial x} = \frac{2h_0}{\delta E} i\omega \bar{p}_1, \\ \left( -\frac{\partial \bar{p}_1(x,t)}{\partial x} \right) = \langle u_1(x,t) \rangle \bar{Z}. \end{cases} \quad (9)$$

(9) tenglamalar sistemasidan foydalanib, bosimni va bo‘ylama o‘rtacha tezlikni topish uchun quyidagi ikki tenglama keltirib chiqarilgan:

$$\frac{d^2 \bar{p}(x)}{dx^2} - \frac{i\omega 2h_0}{\delta E} \bar{Z} \bar{p}(x) = 0 \text{ va } \frac{d^2 \langle \bar{u}(x) \rangle}{dx^2} - \frac{i\omega 2h_0}{\delta E} \bar{Z} \langle \bar{u}(x) \rangle = 0. \quad (10)$$

Keltirib chiqarilgan (10) tenglamaning yechimi kanalning kirish va chiqish qismlarida bosimning garmonik tebranishi berilganlik shartidan foydalanib,

quyidagi ko‘rinishda aniqlangan

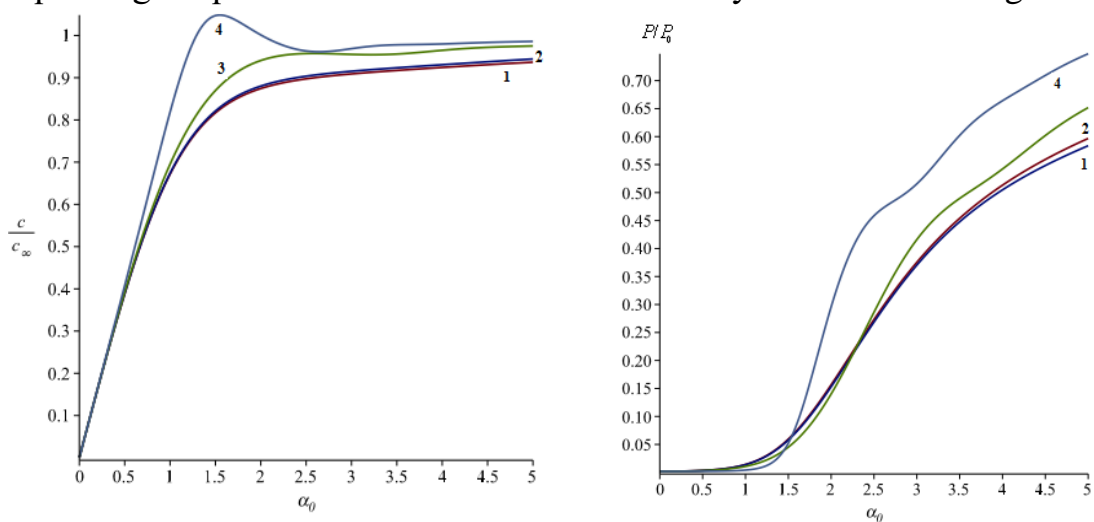
$$\bar{p}(x,t) = \left[ \frac{p_1^0 \left( \text{Sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \left( \frac{L-x}{L} \right) \right) \right)}{\text{Sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \right)} + \frac{p_1^L \text{Sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} \frac{x}{L} \right)}{\text{Sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \right)} \right] e^{i\omega t}, \quad (11)$$

$$\langle \bar{u}(x) \rangle = \frac{h_0^2}{3\eta} \frac{\sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L}{h_0} \times p_1^0 \left[ \frac{\text{Ch} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \frac{L-x}{L} \right)}{\text{Sh} \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L} - \frac{p_1^L \text{Ch} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \frac{x}{L} \right)}{p_1^0 \text{Sh} \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L} \right]. \quad (12)$$

Keltirib chiqarilgan (11) va (12) formulalarga asosan, bu formulalardagi  $\sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L$  argumentning mavhum qismi bosim puls to‘lqining tarqalish tezligini va haqiqiy qismi puls to‘lqining so‘nishini aniqlashi ko‘rsatilgan. SHunga asosan ushbu kompleks kattalikning  $\sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L$  mavhum va haqiqiy qismlarini ajratilib,

bosim puls to‘lqining tarqalish tezligi va puls to‘lqining so‘nishi ko‘rsatkichlari tahlil qilingan. Elastiklik koeffitsiyentining kichik qiymatlarida elastik qovushoq suyuqlikning Nyuton suyuqligi pulsli oqimidagi bosim puls to‘lqining tarqalish tezligi va puls to‘lqining so‘nish ko‘rsatkichlaridan farq qilmasligi ko‘rsatilgan.

1 rasmda elastik qovushoq suyuqligi pulsli oqimida, elastiklik koeffitsiyentining xar xil  $\alpha = 2; EL = 0.001; 0.01; 0.1; 0.5$  qiymatlarida, bosim puls to‘lqini tarqalish tezligining, tebranish chastotasi parametriga bog‘liq ravishda o‘zgarishi tasvirlangan. Rasmlardagi grafiklarni tahlil qilish orqali devori deformatsiyalanuvchi kanalda elastik qovushoq suyuqligining pulsli oqimida puls to‘lqini tarqalish tezligi tebranish chastotasi parametriga bog‘liq ravishda o‘zgarishi, Nyuton suyuqligidagi puls to‘lqinining tarqalish tezligidan farqli bo‘lib, tebranish chastotasi parametrining kichik qiymatlarida tezlikning o‘sishi Nyuton suyuqligi kabi o‘zgarsa, elastiklik koeffitsiyenti katta qiymatlarida puls to‘lqinining tarqalish tezlikda ko‘tarilish xolati ro‘y berishi ko‘rsatilgan.



**Rasm. 1.** Elastik qovushoq suyuqligi pulslı oqimida, elastiklik koeffitsiyentining  $\alpha = 2$ ;  $EL = 0.001$ ;  $0.01$ ;  $0.1$ ;  $0.5$  qiymatlarida, bosim puls to'qlini tarqalish tezligining, tebranish chastotasi parametrıga bog'liq ravishda o'zgarishi.

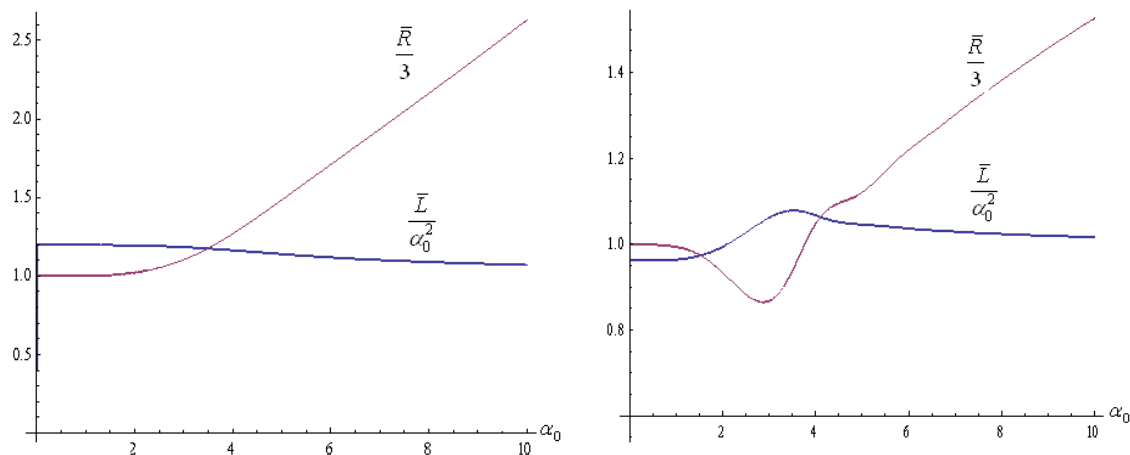
**Rasm. 2.** Elastik qovushoq suyuqligi pulslı oqimida, elastiklik koeffitsiyentining  $\alpha = 2$ ;  $EL = 0.001$ ;  $0.01$ ;  $0.1$ ;  $0.5$  qiymatlarida, bosim puls to'qlini amplitudasi o'zgarishidagi  $P/P_0$  kattalikning, tebranish chastotasi parametrıga bog'liq ravishda o'zgarishi.

Elastik qovushoq suyuqligi pulslı oqimida, elastiklik koeffitsiyentining  $\alpha = 2$ ;  $EL = 0.001$ ;  $0.01$ ;  $0.1$ ;  $0.5$  qiymatlarida, bosim puls to'qlini amplitudasi so'nish kattaligi ko'rsatkichining, tebranish chastotasi parametrıga bog'liq ravishda o'zgarishi 2 rasmda tasvirlangan. Rasmdan ko'rinadiki, elastiklik koeffitsiyentining  $\alpha = 2$ ;  $EL = 0.001$ ;  $0.01$ ;  $0.1$ ;  $0.5$  qiymatlarida, bosim puls to'qlini amplitudasi kamayishi ko'rsatkichining, tebranish chastotasi parametrıga bog'liq ravishda o'zgarishida Nyuton suyuqligidagi o'zgarishlarga nisbatan tebranish chastotasi parametrining birdan katta qiymatlarida o'sishni kuzatish mumkin.

Suyuqlik tebranma oqimidagi gidrodinamik qarshilikning tebranish chastotasi parametrıga bog'liq ravishda o'zgarishini tadqiq qilish oqim effektivligini amalga oshirishda muhim omillardan biri ekanligi ma'lum. SHu boisdan ushbu ishda tebranma oqimdagi gidrodinamik qarshilikning tebranish chastotasi parametrıga bog'liq ravishda o'zgarishini xarakterlash, bosim gradientining suyuqlik sarfiga nisbati orqali ifodalangan kattalikning o'zgarishi yordamida amalga oshirilgan. Bu nisbat quyidagicha ifodalangan:

$$\bar{z} = \left(-\frac{\partial p}{\partial x}\right) / R_0 < u > = \frac{i\alpha_0^2 (M_1 - i\bar{M}_1) \cos(M_1 - i\bar{M}_1)}{3((M_1 - i\bar{M}_1) \cos(M_1 - i\bar{M}_1) - \sin(M_1 - i\bar{M}_1))} = \frac{1}{3}(\bar{R} + i\bar{L}). \quad (13)$$

Bu yerda  $M_1$  va  $\bar{M}_1$  koeffitsiyentlar reologik murakkab suyuqlikning relaksatsiya koeffitsiyenti va tebranish chastotasi parametrıga bog'liq koeffitsiyentlardir. Nyuton suyuqligi uchun bu koeffitsiyentlar faqat tebranish chastotasi parametrıga bog'liq ravishda o'zgarishi e'tiborga olinib, quyidagi kattaliklar orqali aniqlangan:  $M_1 = \alpha_0 / \sqrt{2}$ ,  $\bar{M}_1 = \alpha_0 / \sqrt{2}$ . Aniqlangan (13) formula yordamida sonli hisob amallari bajarilib, Nyuton va reologik murakkab suyuqliklarning tebranma oqimlari uchun gidrodinamik qarshilikning tebranish chastotasi parametrıga bog'liq ravishda o'zgarishi tadqiq qilingan.



**Rasm. 3. Hidrodinamik qarshilik  $\bar{R}$  va induktivlik  $\bar{L}$  ning elastiklik koeffitsiyenti  $EL=0,001$ ,  $\alpha=2$  bo'lgandagi qiymatida tebranishlar chastotasi parametri  $\alpha_0$  ga bog'liq ravishda o'zgarishi.**

**Rasm. 4. Hidrodinamik qarshilik  $\bar{R}$  va induktivlik  $\bar{L}$  ning elastiklik koeffitsiyenti  $EL=0,1$ ,  $\alpha=2$  bo'lgandagi qiymatida tebranishlar chastotasi parametri  $\alpha_0$  ga bog'liq ravishda o'zgarishi.**

Elastiklik sonining 0.05 dan kichik qiymatlarida elastik qovushoq suyuqliklarning tebranma oqimlaridagi gidrodinamik qarshilikning o'zgarishi Nyuton suyuqligidagi kabi o'zgarishi 3 rasmda ko'rsatilgan. Demak, bu holda elastik qovushoq suyuqliklarning tebranma oqimidagi gidrodinamik qarshilikning o'zgarishini aniqlashda Nyuton suyuqligi tebranma oqimidagi gidrodinamik qarshilik xarakteristikalaridan foydalanish mumkinligi ko'rsatilgan. Tebranish chastotasi parametrining birdan katta qiymatlarida elastik qovushoq suyuqliklarning tebranma oqimida gidrodinamik qarshilik o'zgarishida kamayish holati sodir bo'lishi kuzatilgan (Rasm 4.). Hidrodinamik qarshilikning maksimal kamayish holati tebranish chastotasi parametrining  $2 \leq \alpha_0 \leq 4$  oralig'idagi qiymatlarga mos kelishi aniqlangan.

Dissertatsiyaning **“Devori deformatsiyalanuvchi silindrik quvurda elastik qovushoq suyuqlikning pulslı oqimi”** deb nomlanuvchi uchinchi bobida elastik qovushoq suyuqlikning yetarlicha uzun silindrik quvurdagi kirish va chiqish qismlaridagi bosimlar farqi bir xil fazoda tebranadigan sinusoidal qonun bo'yicha o'zgargandagi tebranma oqimi qaralgan. Bunda  $x$  o'qi silindr o'qi bo'yicha yo'naltirilgan, quvur radius bo'yicha o'zgaruvchisi  $r$  orqali va quvurning o'rtacha radiusi esa  $R$  orqali belgilangan. Quvur uzunligi uning radiusiga qaraganda yetarlicha katta bo'lganligi sababli ko'ndalang tezlikning bo'ylama tezlikka nisbati va Reynolds soni yetarlicha kichik miqdor deb qaralgan. Bu hol uchun silindrik quvurda elastik qovushoq suyuqlikning tebranma harakatini xarakterlovchi differentsial tenglamalar sistemasi quyidagi soddalashgan ko'rinishda ifodalangan:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rx}), & \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r} + \frac{\mathcal{G}_r}{r} = 0, \\ (p - p_c) = \frac{E \delta u_r}{R^2 (1 - \nu_1^2)}, \\ \tau_{rx} = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_{k,rx}, \quad \lambda_k \frac{\partial \tau_{k,rx}}{\partial t} + \tau_{k,rx} = \eta_k \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r}. \end{cases} \quad (14)$$

Bu yerda  $\rho$  - zichlik;  $\mathcal{G}_x$ ,  $\mathcal{G}_r$  - bo'ylama va ko'ndalang tezliklar;  $p$ ,  $p_c$  - ichki, tashqi bosim;  $\tau_{rx}$  - urinma kuchlanishi;  $E$  - elastiklik koeffitsiyenti;  $u_r$  - ko'ndalang kesim bo'yicha quvur deformatsiyasi;  $\lambda_k = \frac{\lambda}{k^\alpha}$  - elastik suyuqlik relaksatsiya koeffitsiyenti;  $\eta_k = \frac{\eta}{\xi(\alpha)}$  - elastik suyuqlik dinamik qovushoqlik koeffitsiyenti;

$\xi(\alpha) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^\alpha}$  - Riman dzetta funksiyasi;  $\delta$  - quvur devorining o'rtacha qalinligi;  $\nu$  -

Puasson koeffitsiyenti;  $t$  - vaqt;  $R$  - quvurning o'rtacha radius.

Qaralayotgan masala pulqli tebranma oqim shaklida bo'lgani uchun (14) tenglamalar sistemasi yechimi, noma'lumlarning vaqt bo'yicha eksponentsial ko'rinishda o'zgaruvchi funksiyalari quyidagicha izlangan:

$$\begin{cases} \mathcal{G}_x(x, r, t) = \bar{\mathcal{G}}_{0x}(r) + \bar{\mathcal{G}}_x(x, r)e^{i\omega t}, \mathcal{G}_r(x, r, t) = \bar{\mathcal{G}}_r(x, r)e^{i\omega t}, \\ \tau_{rx}(x, r, t) = \bar{\tau}_0(r) + \bar{\tau}_{rx}(x, r)e^{i\omega t}, p(x, t) = p_0(x) + \bar{p}(x)e^{i\omega t}. \end{cases} \quad (15)$$

(14) tenglamalar sistemasini yechish uchun chegaraviy shartlar quyidagi ko'rinishda berilgan

$$\begin{cases} r = R \text{ da } \mathcal{G}_x = 0, \mathcal{G}_r = \frac{\partial u_r}{\partial t} \text{ bo'ladi}, \\ r = 0 \text{ da } \mathcal{G}_x < \infty, \mathcal{G}_r = 0 \text{ bo'ladi} \end{cases} \quad (16)$$

(14) tenglamalar sistemasiga noma'lumlarning (15) ko'rinishidagi ifodasini qo'yish orqali (14) tenglamalar sistemasi ikki tenglamalar sistema ko'rinishiga keltirilgan. Birinchi tenglamalar sistemasi quvurdagi statsionar oqimni ifoda qiluvchi tenglamalar sistemasi bo'lib, uning yechimi Puazel formulasi orqali aniqlangan.

Ikkinchi tenglamalar sistemasi esa devori deformatsiyalanuvchi quvurdagi elastik qovushoq suyuqlikning pulqli oqimini ifodalovchi tenglamalar sistemasini ifodalagan va u quyidagi ko'rinishga keltirilgan

$$\begin{cases} \rho i \omega \bar{\mathcal{G}}_x = \left( -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\tau}_{rx}), \frac{\partial \bar{\mathcal{G}}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\mathcal{G}}_r}{\partial r} + \frac{\bar{\mathcal{G}}_r}{r} = 0, \\ \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} = 0, \quad i \omega \bar{p} = \frac{E \delta \bar{\mathcal{G}}_r}{R^2 (1 - \nu_1^2)}, \\ \bar{\tau}_{rx} = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{\tau}_{k,rx}, \quad i \omega \lambda_k \bar{\tau}_{k,rx} = \eta_k \frac{\partial \bar{\mathcal{G}}_x}{\partial r}. \end{cases} \quad (17)$$

Bu tenglamalar sistemasi ba'zi bir hisoblashlardan keyin ushbu ko'rinishga keltirilgan

$$\frac{d^2 \bar{\mathcal{G}}_x}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \bar{\mathcal{G}}_x}{dr} - \frac{\rho(i\omega)}{\bar{\eta}(i\omega)} \bar{\mathcal{G}}_x = -\frac{1}{\bar{\eta}(i\omega)} \left( -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right), \quad (18)$$

bu yerda

$$\bar{\eta}(i\omega) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\eta_k}{(1 + i\omega \lambda_k)}, \quad \eta_k = \frac{\eta}{\xi(\alpha) k^\alpha}, \quad \lambda_k = \frac{\lambda}{k^\alpha}.$$

Hosil qilingan (18) tenglama Bessel tenglamasi bo'lganligi sababli, uning yechimi Bessel funksiyalari yordamida, berilgan chegaraviy shartlar asosida quyidagi ko'rinishda keltirib chiqarilgan:

$$\bar{g}_x(x, r, t) = \frac{1}{\rho i \omega} \left( -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) \left( 1 - \frac{J_0 \left( i^{3/2} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*} (i\omega) R} \right)}{J_0 \left( i^{3/2} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*} (i\omega)} \right)} \right) e^{i\omega t}. \quad (19)$$

Keltirib chiqarilgan (19) tenglamadan foydalanib, o'rtalashtirilgan bo'ylama tezlikni, bosim gradienti bilan bog'lovchi ushbu tenglama hosil qilingan

$$\frac{d\bar{p}}{dx} = -\bar{Z} < \mathcal{G}_x(x) >. \quad (20)$$

Bu yerda

$$\bar{Z} = \left( \frac{1}{\rho i \omega} \left( 1 - \frac{2J_1 \left( i^{3/2} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*} (i\omega)} \right)}{i^{3/2} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*} (i\omega)} J_0 \left( i^{3/2} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*} (i\omega)} \right)} \right) \right)^{-1}.$$

Aniqlangan (20) tenglamada bosim gradienti bo'ylama o'q bo'yicha o'zgaruvchi bo'lganligi sababli suyuqlikning o'rtalashtirilgan bo'ylama tezligi ham shu o'q bo'yicha o'zgaradi. (20) tenglamani o'rtalashtirilgan bo'ylama tezligini bosim gradienti bilan bog'lovchi tenglama sifatida qarash mumkin. Bu tenglamada ikkita noma'lum bo'lib, tenglamalar soni bitta tenglamadan iborat bo'lganligi sababli, ikkinchi tenglama uzliksizlik tenglamasi yordamida quyidagi ko'rinishda hosil qilingan:

$$\frac{d < \mathcal{G}_x(x) >}{dx} = -\frac{\bar{p} i \omega}{\bar{a}^*}, \text{ bu yerda } \bar{a}^* = \frac{E \delta}{2R(1-\nu_1^2)} \quad (21)$$

(20) tenglamaning xar ikki tomonini  $x$  o'zgaruvchi bo'yicha differensiallab, unga (21) tenglamani qo'llash orqali ushbu tenglama hosil qilingan:

$$\frac{d^2 \bar{p}(x)}{dx^2} - \frac{i\omega}{\bar{a}^*} \bar{Z} \bar{p} = 0. \quad (22)$$

Bu tenglama yechimi quyidagi chegaraviy shartlar asosida aniqlangan

$x = 0$ , bo'lganda  $\bar{p} = \bar{p}^0 e^{i\omega t}$  bo'ladi,  $x=L$ , bo'lganda  $\bar{p} = \bar{p}^L e^{i\omega t}$  bo'ladi.

$$\bar{p}_1(x, t) = \left[ \frac{p^0 \left( sh \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \left( \frac{L-x}{L} \right) \right) \right)}{sh \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \right)} + \frac{p^L sh \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \frac{x}{L} \right)}{sh \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \right)} \right] e^{i\omega t}. \quad (23)$$

Aniqlangan (23) formuladan foydalanib, (20) tenglamadan o'rtacha bo'ylama tezlik taqsimlanishi uchun quyidagi formula aniqlangan

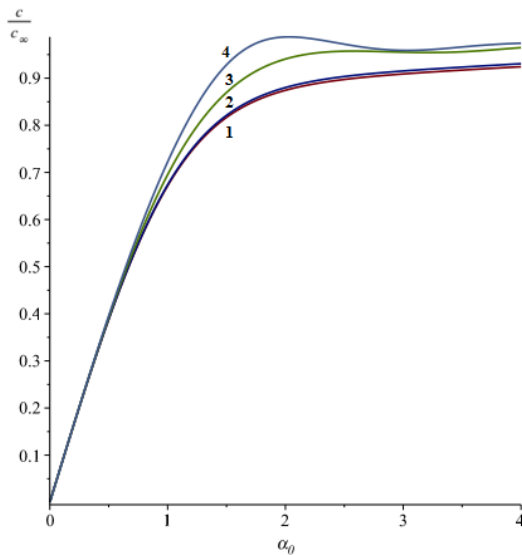
$$\langle \mathcal{G}_x(x,t) \rangle = \frac{R^2}{8\eta} \frac{\sqrt{\frac{i\omega}{a}} \bar{Z}L}{L} \left( \frac{p^0 ch\left(\sqrt{\frac{i\omega}{a^*}} \bar{Z}L \left(\frac{L-x}{L}\right)\right)}{sh\left(\sqrt{\frac{i\omega}{a^*}} \bar{Z}L\right)} - \frac{p^L ch\left(\sqrt{\frac{i\omega}{a^*}} \bar{Z}L \frac{x}{L}\right)}{sh\left(\sqrt{\frac{i\omega}{a^*}} \bar{Z}L\right)} \right) e^{i\omega t}. \quad (24)$$

Aniqlangan (23) va (24) yechimlarning, xususiyl holida elastik qovushoq suyuqlik relaksatsiya koeffitsiyentining nolga teng bo'lganda aniqlangan (23) va (24) formulalardan Nyuton suyuqligining pulslil oqimi uchun formulalar keltirib chiqarilgan. Bu formulalar yordamida Nyuton suyuqligining pulslil oqimi uchun keltirilgan tadqiqot natijalarini, elastik qovushoq suyuqlikning silindrik quvurdagi pulslil oqimi sonli hisob natijalari bilan solishtirish mumkinligi ko'rsatilgan.

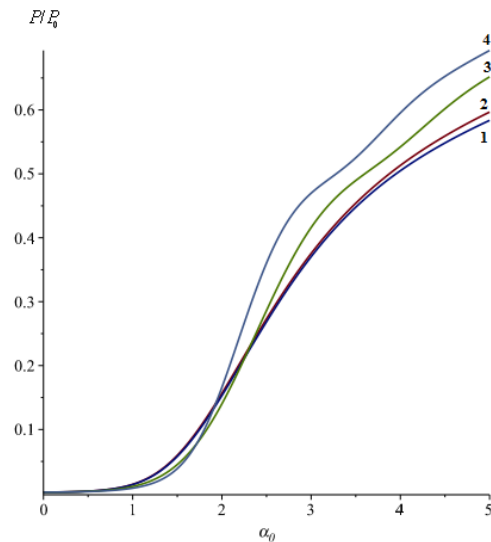
Elastik qovushoq suyuqlikning silindrik quvurdagi pulslil oqimi masalasini yechish natijasida keltirib chiqarilgan (23) va (24) yechimlar, ushbu  $\sqrt{\frac{i\omega}{a^*}} \bar{Z}L$  parametrnga uzviyl ravishda bog'liql o'zgarishi aniqlangan. SHuning uchun bu parametrning haqiqiy va mavhum qismlarini ajratish natijasida, uning haqiqiy qismi puls to'lqinining so'nish ko'rsatkichini, mavhum qismi esa puls to'lqin tarqalish tezligini xarakterlashi aniqlangan.  $\sqrt{\frac{i\omega}{a^*}} \bar{Z}L$  - parametr o'z ichiga kompleks

argumentli Bessel funksiyalarini olganligi sababli, uning haqiqiy va mavhum qismlarini umumiy shaklda ajratish imkoniyati yo'qligi uchun, Bessel funksiyasi argumenti absolyut qiymatining kichik va katta qiymatlaridagi asimptotik formulalardan foydalanib, hisob natijalari tahlil qilingan.

Argument absolyut qiymatining kichik qiymatlarida, Bessel funksiyalari qiymatlarini hisoblash uchun, ularning qatorga yoyilgan qiymatlaridan foydalanilgan. Buning natijasida devori deformatsiyalanuvchi silindrik quvurlardagi elastik qovushoq suyuqligining pulslil oqimida bosim puls to'lqini tarqalish tezligining va puls to'lqinning, to'lqin uzunligiga nisbatan so'nish ko'rsatkichilarining tebranish chastotasi parametri bog'liql ravishda o'zgarishlari 5 va 6 rasmlarda grafiklar asosida tasvirlangan. Grafiklardan devori deformatsiyalanuvchi silindrik quvurlardagi elastik qovushoq suyuqligining pulslil oqimida puls to'lqini tarqalish tezligiga va puls to'lqinning, to'lqin uzunligiga nisbatan so'nish ko'rsatkichilariga tebranish chastotasi parametrining  $0 \leq \alpha_0 \leq 4$  kesmadagi qiymatlarida suyuqlikning elastiklik xususiyati deyarli ta'sir ko'rsatmasligi aniqlangan. Bunga asosan, tebranish chastotasi parametrining  $0 \leq \alpha_0 \leq 4$  kesmadagi qiymatlar to'plamida elastik qovushoq suyuqlikning devori deformatsiyalanuvchi quvurdagi pulslil oqimini Nyuton suyuqligi pulslil oqimi sifatida tadqiq qilish mumkinligi ko'rsatilgan.

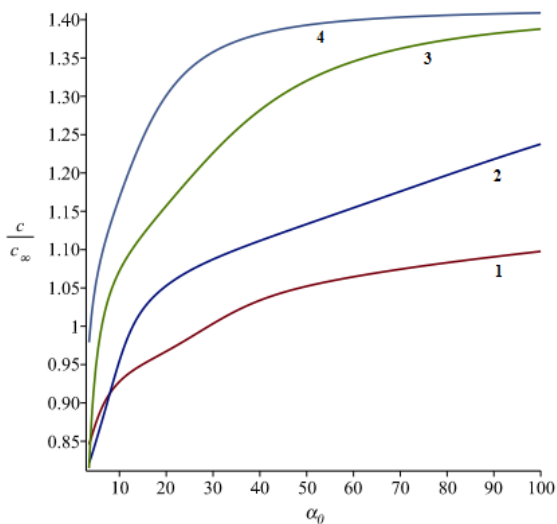


**Rasm. 5.** Devori deformatsiyalanuvchi silindrik quvurda elastik qovushoq suyuqligi pulsi oqimida puls to‘lqini tarqalish tezligini tebranish chastotasi parametri  $0 \leq \alpha_0 \leq 4$  kesmadagi qiymatlariga bog‘liq ravishda o‘zgarishi. (1-EL=0.001; 2-EL=0.01; 3-EL=0.1; 4-EL=0.5).

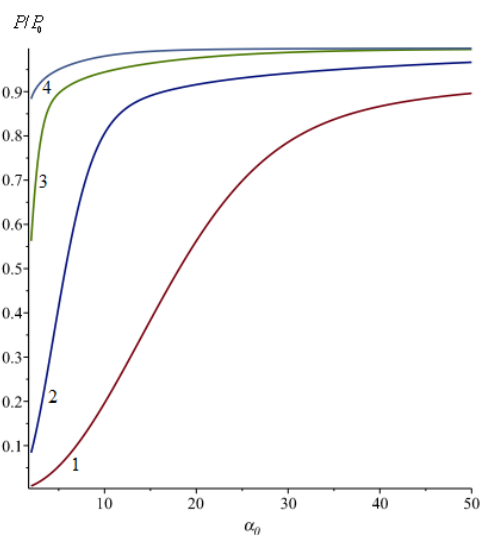


**Rasm. 6.** Elastik qovushoq suyuqlikning pulsi oqimida elastiklik koeffitsiyentining har xil qiymatlarida, to‘lqin uzunligiga nisbatan olingan to‘lqin so‘nishi ko‘rsatkichinig tebranish chastotasi parametriga bog‘liq ravishda o‘zgarishi. (1-EL=0.001; 2-EL=0.01; 3-EL=0.1; 4-EL=0.5).

Argument absolyut qiymatining katta bo‘lgan qiymatlarida devori deformatsiyalanuvchi silindrik quvurlarda elastik qovushoq suyuqligi pulsi oqim hisob natijalari keltirilgan. Bunda Bessel funksiyalarining argumenti kompleks sondan iborat bo‘lganda uning haqiqiy va mavhum qismlarini aniqlashning umumiy xoldagi formulalari mavjud bo‘lmaganligi uchun, argument absolyut qiymatining katta qiymatlariga mos keluvchi asimptotik formulalardan foydalanilgan va tegishli grafiklar 7 rasmda chizilgan. 8 rasmdagi grafiklardan ko‘rinadiki, bosim puls to‘lqini tarqalish tezligi tebranish chastotasi parametrining  $4 \leq \alpha_0 < \infty$  oraliqdagi qiymatlarida asimptotik ravishda o‘shishi va elastiklik koeffitsiyentining katta qiymatlarida, bu o‘shish, Nyuton suyuqligiga tegishli bo‘lgan bosim puls to‘lqini tarqalish tezligi o‘shishiga qaragandan ham kattaroq qiymatlarda o‘shishi aniqlangan.



**Rasm. 7. Devori deformatsiyalanuvchi silindrik quvurda elastik qovushoq suyuqligi pulsi oqimida puls to‘lqini tarqalish tezligini tebranish chastotasi parametri  $4 \leq \alpha_0 \leq 100$  kesmadagi qiymatlariga bog‘liq ravishda o‘zgarishi (1-EL=0.001; 2-EL=0.01; 3-EL=0.1; 4-EL=0.5;  $\alpha = 2$ ).**



**Rasm. 8. Elastik qovushoq suyuqlikning pulsi oqimida elastiklik koeffitsiyentining har xil qiymatlarida, to‘lqin uzunligiga nisbatan olingan to‘lqin so‘nishi kattaligiga teskari bo‘lgan kattalikning tebranish chastotasi parametrining  $4 \leq \alpha_0 \leq \infty$  kesmadagi qiymatlarida o‘zgarishi (1-EL=0.001; 2-EL=0.01; 3-EL=0.1; EL=0.5).**

## XULOSA

**“Devori deformatsiyalanuvchi quvur va kanallarda elastik qovushoq suyuqlikning pulsi oqimini tadqiq qilish” mavzusidagi dissertatsiya ishi bo‘yicha quyidagi xulosalar taqdim etildi.**

1. Devori deformatsiyalanuvchi kanal va silindrik quvurlarda elastik qovushoq suyuqliklarning pulsi oqimi masalasini tadqiq qilish uchun, devor deformatsiyasi differentsial tenglamasi, elastik qovushoq suyuqlikning reologik tenglamasi va suyuqlikning harakat differentsial tenglamalari birgalikda sistema qilib kontakt masalalari shakllantirilgan. Bu masalalarni yechish uchun chegaraviy shartlar keltirilgan.

2. Devori deformatsiyalanuvchi kanaldagi elastik qovushoq suyuqliklarning pulsi oqimida puls to‘lqinining tarqalish tezligini va bosim puls to‘lqinining to‘lqin davri uzunligiga nisbatan amplitudasi so‘nish ko‘rsatkichining, tebranish chastotasi parametriga bog‘liq ravishda o‘zgarish grafiklari keltirilgan.

3. Elastik qovushoq suyuqliklarning pulsi oqimidagi gidrodinamik qarshilik, Nyuton suyuqligi pulsi oqimidagi gidrodinamik qarshilik bilan, tebranish chastotasi parametrining kichik qiymatlarida deyarli bir xilda o‘zgarishi aniqlangan. Tebranish chastotasi parametrining katta qiymatlarida gidrodinamik qarshilik o‘zgarishida kamayish holati sodir bo‘lishligi va uning maksimal

kamayish holati tebranish chastotasi parametrining  $2 \leq \alpha_0 \leq 4$  oralig'idagi qiymatlarida ro'y berishi aniqlangan.

4. Suyuqlikning elastiklik xususiyatini e'tborga olgandagi pulslı oqim xarakteristikalari, tebranish chastotasi parametrining kichik qiymatlarda puls to'lgini tarqalish tezligiga va to'lgın amplitudasi so'nish ko'rsatkichiga deyarli ta'sir ko'rsatmasligi aniqlangan. Bunday hollarda devori deformatsiyalanuvchi silindrik quvurda elastik qovushoq suyuqlik pulslı oqimi hisob natijalari o'rniga Nyuton suyuqligining pulslı oqim hisob natijalarni olish mumkinligi ko'rsatilgan.

5. Tebranish chastotasi parametrining katta qiymatlarda elastik qovushoq suyuqligi pulslı oqimida puls to'lgini tarqalish tezligi va to'lgın so'nish ko'rsatkichi Nyuton suyuqligining pulslı oqim hisob natijalardan sezilarli ravishda farq qilishi va bunday xollarda devori deformatsiyalanuvchi silindrik quvurda elastik qovushoq suyuqlik pulslı oqimi hisob natijalarini alohida e'tiborga olish zarurligi ko'rsatilgan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/2025.27.12.FM/T.09.03  
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ  
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИМЕНИ ШАРАФА РАШИДОВА**

---

**УРГЕНЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АБУ  
РАЙХАНА БЕРУНИ**

**АБДИКАРИМОВ НАБИЖОН ИБАДУЛЛАЕВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСОВОГО ТЕЧЕНИЯ ВЗКОУПРУГОЙ  
ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ И КАНАЛАХ С ДЕФОРМИРУЕМОЙ  
СТЕНКОЙ**

**01.02.05 – Механика жидкости и газа**

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

**Самарканд - 2026**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за B2024.2.PhD/FM1078.**

Диссертация выполнена в Ургенчском государственном университете имени Абу Райхана Беруни.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета ([www.samdu.uz](http://www.samdu.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyo.net/uz](http://www.ziyo.net/uz)).

**Научный руководитель:**

**Наврузов Куралбай**

доктор физико-математических наук,  
профессор

**Официальные оппоненты:**

**Махмудов Жамол Махмуд угли,**

доктор физико-математических наук, доцент

**Халияров Эркин Чоршанбиевич**

кандидат физико-математических наук, доцент

**Ведущая организация:**

**Институт механики и сейсмостойкости  
сооружений им. М.Т. Уразбаева**

Защита диссертации состоится «17» апреля 2026 года в 15-00 часов на заседании Научного совета DSc.03/2025.27.12.FM/T.09.03 при Самаркандском государственном университете имени Шарафа Рашидова. (Адрес: 104000, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (+99866) 239-11-40, факс: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: [devonxona@samdu.uz](mailto:devonxona@samdu.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета имени Шарафа Рашидова (регистрационный номер 108).

Адрес: 140104, Самарканд, Университетский бульвар, 15. (+99866) 239-17-25.

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 года.

(реестр протокола рассылки № \_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 года.)



**Р.И.Халмурадов**

Председатель научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор

**У.А.Нишонов**

Ученый секретарь научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
доктор философии по физико-математическим наукам

**Б.Х.Хужаёров**

Председатель научного семинара при  
научном совете по присуждению ученых степеней,  
доктор физико-математических наук, профессор

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В различных отраслях мировой промышленности, в частности, в нефтегазовой, химической, пищевой и гидротехнической сферах, совершенствование технологических процессов требует решения актуальных гидромеханических задач. К таким задачам относятся моделирование пульсовых потоков нелинейно-вязких (неньютоновских) жидкостей в каналах и трубах с деформируемыми стенками, разработка энергосберегающих технологий и вопросы оптимального распределения расхода жидкости. В ведущих развитых странах, таких как Япония, США, Китай, Россия и Германия, уделяется большое внимание расчету динамики потока в гидротехнических сооружениях и технологических системах с учетом реологических свойств жидкостей, повышению эффективности систем и разработке новых математических моделей.

На сегодняшний день во всем мире ведутся многочисленные научно-исследовательские работы, посвященные обеспечению устойчивости при пульсовом давлении в трубопроводах, используемых для транспортировки сред сложного состава, включая цилиндрические трубы с эластическими и пластическими свойствами, а также численному анализу протекающих в них процессов. Поэтому создание усовершенствованных математических моделей течения неньютоновских жидкостей в трубах с деформируемыми стенками с учетом свойств релаксации и вязкости жидкости, а также оптимизация гидродинамических процессов считаются приоритетными направлениями современной науки и техники. Основная цель исследователей направлена на повышение энергоэффективности и снижение транспортных расходов. Наряду с этим, особое внимание уделяется исследованию сложных потоков полимерных растворов, буровых и физиологических жидкостей (крови, слюны), а также анализу механизмов гашения нежелательных колебаний в пульсовых потоках.

В нашей республике в различных отраслях народного хозяйства, в частности, в сельском хозяйстве, осуществляются комплексные меры по совершенствованию систем капельного и надпочвенного орошения, созданию математических моделей для расчета движения жидкости в трубах из композитных материалов и их широкому внедрению в практику. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы определены важные задачи, в том числе, по «разработке технической политики по энергосбережению и повышению эффективности за счет модернизации и реконструкции мощностей на крупных промышленных предприятиях». В решении данных задач важное значение имеет повышение долговечности гидротехнических сооружений, учет реологических свойств неньютоновских жидкостей и деформации стенок труб.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит реализации задач, определенных в Указе Президента Республики Узбекистан

№ УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового <sup>2</sup>Узбекистана на 2022–2026 годы», Указе № УП-165 от 6 июля 2022 года «Об утверждении Стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2022–2026 годы», а также в других нормативно-правовых актах, касающихся данной деятельности.

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

**Степень изученности проблемы.**

В настоящее время проводятся научно-исследовательские работы по пульсовым течениям вязкоупругих жидкостей в трубах и каналах с деформируемыми стенками, в ведущих научных центрах и высших учебных заведениях мира. В частности по созданию математической модели и совершенствованию алгоритмов расчета, в Международном реологическом обществе (The Society of Rheology, SR), в Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology) (США), в Британском реологическом обществе (British Society of Rheology, ESR), в Оксфордском университете (University of Oxford), в Кембриджском университете (Cambridge University), в Манчестерском университете (University of Manchester) (Великобритания), в Германском реологическом обществе (German Rheological Society, DRG) (Германия), в реологическом обществе Индии (Indian Society of Rheology, ISR), в реологическом обществе Австралии (Australian Society of Rheology, ASR), в Российском обществе реологов, в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова (РФ), в Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН УзР (Узбекистан) достигаются большие научные результаты.

Течение вязких жидкостей впервые было изучено в научно-исследовательской работе И.С. Громеки на тему “Волнообразное течение жидкости в трубе с деформируемой стенкой”. В этой области проводили исследования зарубежные ученые И.Б. Крэндалл, П. Ламбози, Дж.Р. Уомерсли, Х.Б. Атабек, Ф.М. Скалак, М.Дж. Тейлор, Т. Педли, Э. Лайтфут, З. Динг, Е.П. Валуева, Л. Касанеллис, Дж. Ортин, Ф.Х. Тазюков, Е.Р. Кутузова, Б.А. Снигерев, Ф.А. Гарифуллин и другие, а из ученых Узбекистана Дж.Ф. Файзуллаев, Дж.А. Акилов, Б.Х. Худжаёров, К.Ш. Латипов, О.И. Умаров, К. Наврузов, З. Маликов, И. Худжаев, С. Худайкулов и др. Однако, несмотря на то, что проведено множество исследований по изучению движения ньютоновских жидкостей в трубах и каналах с деформируемыми стенками, в настоящее время проблемы пульсового течения вязкоупругих жидкостей в трубах и каналах с деформируемыми стенками недостаточно изучены и не в полной мере реализованы на практике. **Связь темы диссертации с планами научно-исследовательской работы высшего образовательного**

---

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы» от 28 января 2022 года.

**учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с научно-исследовательским планом кафедры «Прикладной математики» Ургенчского государственного университета в рамках научно-исследовательского проекта OT-F4-04(05) на тему «Использование спектрального метода решения материальных нелинейных эволюционных уравнений. Биомеханика сердечно-сосудистой системы» (2017-2020 гг.) и на основании научного плана «Исследование механики неньютоновской жидкости» кафедры «Математического инжиниринга».

**Цель исследования** заключается в формулировании задач пульсовых течений вязкоупругих жидкостей в каналах и цилиндрических трубах с деформируемыми стенками с использованием моделей неньютоновских жидкостей и с учетом деформации стенки и их аналитическом решении.

**Задачи исследования:**

сформулирование дифференциальных уравнений движения вязкоупругих жидкостей совместно с дифференциальными уравнениями деформации стенок в виде системы и с помощью этой системы решение задач пульсовых течений вязкоупругих жидкостей в каналах и цилиндрических трубах с деформируемыми стенками;

вывести формулы для определения распределения скорости, расхода жидкости и давления путем аналитического решения сформулированных контактных задач;

исследовать изменения гидродинамического сопротивления в зависимости от частоты колебаний при пульсовых течениях вязкоупругих жидкостей в каналах и цилиндрических трубах с учетом упругих свойств жидкостей на основе выведенных формул;

определить влияние реологических характеристик вязкоупругой жидкости на скорость распространения пульсовой волны давления и степень затухания волны, генерируемой при импульсном течении вязкоупругой жидкости на стенках канала и цилиндрической трубы.

**Объект исследования** – пульсовое течение вязкоупругой жидкости в каналах и цилиндрических трубах с деформируемыми стенками.

**Предметом исследования** являются математические модели пульсовых течений вязкоупругих жидкостей в трубах с деформируемыми стенками.

**Методы исследования:** аналитические методы решения задач о пульсовых течениях вязкоупругих несжимаемых жидкостей в трубах и каналах с деформируемыми стенками, методы решения уравнений математической физики, численный анализ полученных решений.

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в следующем:

разработаны усовершенствованные реологические модели классических вязкоупругих жидкостей для неоднородного случая, на основе которых сформулированы основные дифференциальные уравнения движения и предложены упрощенные варианты решения задач пульсового течения вязкоупругих жидкостей по трубопроводам;

сформулированы новые задачи пульсового течения вязкоупругой жидкости в каналах и цилиндрических трубах с деформируемыми стенками при соответствующих граничных условиях, и, путем их аналитического решения выведены расчетные формулы для определения распределения скоростей, расхода жидкости и динамики передаточной функции;

выявлен характер изменения гидродинамического сопротивления в зависимости от частоты колебаний при пульсовом течении вязкоупругих жидкостей;

научно обосновано снижение сопротивления в определенном диапазоне значений частоты колебаний за счет проявления упругих свойств жидкости;

установлены закономерности изменения скорости распространения пульсовых волн и декрементов, их затухания вдоль деформируемых стенок каналов и цилиндрических труб под влиянием реологических характеристик вязкоупругой жидкости;

разработан метод определения коэффициента упругости стенки трубы путем измерения скорости распространения пульсовой волны стенки в деформируемых трубах.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

создана возможность применения математического моделирования пульсовых потоков крови в крупных артериальных сосудах с учетом ее вязкоупругих реологических свойств;

получены расчетные формулы для определения гидродинамических характеристик пульсового потока на основе вязкоупругой модели;

обоснована применимость полученных закономерностей для оценки эффективности гемодинамики и снижения потерь давления в деформируемых каналах при пульсовом режиме движения.

**Достоверность результатов исследования** Достоверность результатов, полученных при исследовании пульсовых течений вязкоупругих жидкостей в деформируемых трубах обосновывается, в частности, при переходе к движению ньютоновских жидкостей, с согласованием результатов исследований Ж.Р.Уомерсли, Э.Лайтфута в данной области.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость исследования объясняется аналитическим решением задач пульсового течения упруговязких жидкостей в каналах и цилиндрических трубах с деформируемыми стенками, в частности, выявлением новых гидродинамических закономерностей в результате сравнения результатов решения ньютоновских жидкостей.

Практическая значимость исследования выражается в том, что удалось определить величину– модуля упругости, характеризующей деформацию стенки трубы, путем измерения скорости распространения пульсовых волн при колебательном движении упруговязких жидкостей в трубах.

**Внедрение результатов исследования.** Исследование пульсового течения вязкоупругих жидкостей в деформируемых трубах позволило математически моделировать пульсовое движение крови в артериальных сосудах, и решения этих задач были использованы в рамках

фундаментального проекта ОТ-Ф4-04(05) «Применение спектрального метода к решению матричных нелинейных эволюционных уравнений, биомеханика сердечно-сосудистой системы», выполненного в Ургенчском государственном университете в 2017–2020 годах (справка Ургенчского государственного университета № 02-84/5 от 30 апреля 2025 года). В результате этого обеспечена возможность определения гидродинамических сопротивлений в артериальных сосудах на основе закономерностей распространения и затухания пульсовых волн, полученных с помощью программного средства математического моделирования артериальной системы.

Алгоритмы решения задач пульсового течения вязкоупругих жидкостей в трубах и каналах с деформируемыми стенками были использованы в прикладном проекте ОТ-Атех-2018-340 «Теоретическое и численное исследование прикладных геофизических задач динамики двухскоростных сред», выполненном в Каршинском государственном университете в 2018–2020 годах (справка Каршинского государственного университета № 03/672 от 9 марта 2024 года). В результате обеспечена возможность численного моделирования волновых процессов в сложных гидродинамических системах и анализа эффективности транспортировки жидкости в трубах с упругими стенками.

**Апробация результатов исследований.** Результаты данного исследования были обсуждены на 6 международной и 4 республиканской научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследований.** Всего по теме исследования опубликовано 9 научных работ (в 6 республиканских и 3 зарубежных журналах) в научных изданиях, рекомендованных к публикации основных научных результатов диссертаций ВАК Республики Узбекистан.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 110 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность и востребованность темы исследования, освещена степень изученности проблемы, определены цель и задачи, объект и предмет исследования, раскрыто соответствие работы приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены сведения о внедрении результатов исследования в практику, апробации и опубликованных работах, структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Составление дифференциальных уравнений движения вязкоупругой жидкости и деформации стенки, и их методы упрощения»** представлены дифференциальные уравнения деформации стенки трубы, в виде симметричной ортотропной форме:

$$\begin{cases} M_1 \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial u_x}{\partial t} + k_1 u_x = -\mu \left( \frac{\partial V_x}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial x} \right)_{r=R} + \frac{\partial u_r}{\partial x} \frac{T_{20} - T_{10}}{R} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial x}, \\ M_1 \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} + c_2 \frac{\partial u_r}{\partial t} + k_2 u_r = \left( P - 2\mu \frac{\partial V_r}{\partial r} \right)_{r=R} + \frac{u_r}{R^2} T_{10} - \frac{\sigma_1}{R} + T_{10} \frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $T_{20}$  - постоянное продольное напряжение, действующее на единицу окружности;  $T_{10}$  - круговое напряжение, соответствующее трансмуральному давлению  $p$ ;  $k_1, k_2$  - продольные и радиальные компоненты коэффициента вязкости;  $c_1, c_2$  - коэффициенты упругости;  $u_x, u_r$  - компоненты продольного и радиального смещения;  $t$  - время;  $\eta$  - коэффициент динамической вязкости жидкости;  $\rho_w$  - плотность стенки;  $h$  - толщина стенки;  $R$  - радиус в невозмущенном состоянии трубы;  $\mathcal{V}_x$  и  $\mathcal{V}_r$  - продольная и радиальная скорость жидкости;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  - натяжения стенки;  $T_{10} = Rp$  - в виде определяется по закону Лапласа.

Уравнение движения вязкоупругой жидкости представлено в виде “напряжений”. Систематизированы система дифференциальных уравнений движения вязкоупругой жидкости в каналах и трубах с деформируемыми стенками, где приведены уравнения деформации стенки, уравнение движения жидкости и реологические уравнения. При упрощении этой системы уравнений считается, что отношение радиуса трубы или ширины канала к её длине и числу Рейнольдса достаточно малыми и, таким образом, система уравнений линейризовалась. Для решения данных задач принимаются, что продольная скорость на стенке канала или трубы равна нулю, а поперечная скорость равна скорости деформации стенки. Считается, что течение жидкости в трубе или канале происходит симметрично по продольной оси, поэтому градиент продольной скорости жидкости в центре потока равен нулю, а сама поперечная скорость принимается равной нулю.

Во второй главе диссертации, озаглавленной «**Исследование пульсового течения упруговязкой жидкости в канале ограниченных двумя параллельными плоскими деформируемыми стенками**» рассматривается пульсовое течение упруговязкой жидкости в канале с деформируемой стенкой.

При этом уравнение деформации, движение и реология стенки линейризуются при условии, что отношение ширины канала к его длине и число Рейнольдса достаточно малы. Система линейризованных уравнений движения упруговязкой жидкости имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, & \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial y} = 0, & \tau = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_k, \\ \lambda_k \frac{\partial \tau_k}{\partial t} + \tau_k = \eta_k \frac{\partial u}{\partial y}, \end{cases} \quad (2)$$

здесь  $\rho$  - плотность жидкости;  $u, v$  - продольная и поперечная скорость;  $p$  - внутреннее давление;  $\lambda_k = \frac{\lambda}{k^\alpha}$  - коэффициент релаксации упругой жидкости;  $\eta_k = \frac{\eta}{\xi(\alpha)k^\alpha}$  - коэффициент динамической вязкости упругой жидкости;  $\tau$  - напряжение;  $\lambda$  - коэффициент релаксации;  $\eta$  - коэффициент динамической вязкости.

Уравнение движения стенки предоставляется в виде:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{2h_0^2}{\delta E} \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (3)$$

здесь  $p$  - внутреннее давление;  $\rho$  - плотность жидкости;  $t$  - время;  $h$  - ширина канала,  $E$  - коэффициент упругости стенки канала,  $h_0$  - среднее значение ширины канала.

Исследовано колебательное течение вязкоупругой жидкости в канале под действием периодически меняющегося во времени градиента давления. С учетом синусоидального изменения давления во времени во входной и выходной частях канала изменение градиента давления определяется следующим образом:

$$\left(-\frac{\partial p(t)}{\partial x}\right) = \left(-\frac{\partial p_0}{\partial x}\right) + \left(-\frac{\partial p_1}{\partial x}\right)e^{i\omega t}. \quad (4)$$

Здесь  $\left(-\frac{\partial p_0}{\partial x}\right)$  - градиент давления в стационарном потоке;  $\left(-\frac{\partial p_1}{\partial x}\right)$  - градиент давления, выражающий изменение амплитуды колебаний в колеблющемся потоке;  $\omega$  - частота колебаний;  $t$  - время.

Учтено, что изменение градиента давления состоит из двух частей: первая часть является постоянной, а вторая часть представляет собой изменяющуюся во времени периодическую функцию. Поэтому, решение уравнения (4) выражается в виде суммы двух функций

$$u = u_0(y) + u_1(y)e^{i\omega t}, \quad \tau = \tau_0(y) + \tau_1(y)e^{i\omega t}, \quad \frac{\partial p(t)}{\partial x} = \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\partial p_1}{\partial x} e^{i\omega t}. \quad (5)$$

При этом показано, что решение, соответствующее первому члену решения, является стационарным течением, а решение, соответствующее действительной части второго члена, является решением, соответствующим колебательному потоку. Здесь показано, что стационарное течение

жидкости состоит из течения Пуазейеля. На основе второй части сформулированы новые задачи пульсового течения вязкоупругой жидкости в канале с деформируемой стенкой. Вместо граничных условий принято, что продольная скорость жидкости у стенки канала равна нулю, а поперечная скорость выражается скоростью деформацией стенки, в центральной части канала градиент продольной скорости, и сама поперечная скорость равна нулю. Система уравнений (1) с помощью экспоненциальных замен (5) преобразована в неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами и с помощью граничных условий определено её решение в следующем виде:

$$\frac{u(x, y, t)}{u_{1 \max}^0} = 2 \left( -\frac{\partial \bar{p}_1(x)}{\partial x} \right) \left[ \frac{1}{i\alpha_0^2} \left( 1 - \frac{\cos \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{y}{h} \right)}{\cos \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)} \right) e^{i\omega t} \right]. \quad (6)$$

Здесь

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} h_0, \quad \eta^*(i\omega) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k^\alpha}{\xi(\alpha)(k^\alpha + \lambda i\omega)^2}, \quad \nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad \left( -\frac{\partial p_1}{\partial x} \right) / \left( -\frac{\partial p_{10}}{\partial x} \right) = -\frac{\partial \bar{p}_1}{\partial x};$$

$$u_{1 \max}^0 = \frac{1}{2\eta} \left( \frac{p_1^0 - p_1^L}{L} \right) h^2 - \text{максимальная продольная скорость при}$$

стационарном течении вязкой жидкости в канале с недеформируемой стенкой.

Интегрируя обе части формулы (6) от  $-h$  до  $h$ , и, разделив его на  $2h$ , получили следующую формулу для средней продольной скорости жидкости

$$\frac{\langle u(x, t) \rangle}{\langle u_0 \rangle} = \text{real} \left( -\frac{\partial \bar{p}_1(x)}{\partial x} \right) \left[ \frac{1}{i\alpha_0^2} \left( 1 - \frac{\sin \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)}{\left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cos \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)} \right) e^{i\omega t} \right]. \quad (7)$$

Здесь  $\langle u_0 \rangle = \frac{1}{3\eta} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right)_0 h^2$  - средняя продольная скорость в стационарном потоке вязкой жидкости в канале с недеформирующей стенкой. Градиент давления находится из уравнения (7)

$$\left( -\frac{\partial \bar{p}_1(x, t)}{\partial x} \right) = \langle u_1(x, t) \rangle \bar{Z}, \quad (8)$$

где

$$\bar{Z} = \left[ \frac{1}{i\alpha_0^2} \left( 1 - \frac{\sin \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)}{\left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \cos \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \left( \frac{1}{\eta^*(i\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \right)} \right) \right]^{-1}.$$

Полученное уравнение (8) является уравнением двух неизвестных, поэтому необходимо сформулировать ещё одно уравнение определяющее деформацию стенки. Это уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \langle u(x,t) \rangle}{\partial x} = \frac{2h_0}{\delta E} i\omega \bar{p}_1.$$

Присоединяя оба эти уравнения, составлена система уравнений следующего типа

$$\begin{cases} \frac{\partial \langle \bar{u}_1(x,t) \rangle}{\partial x} = \frac{2h_0}{\delta E} i\omega \bar{p}_1, \\ \left( -\frac{\partial \bar{p}_1(x,t)}{\partial x} \right) = \langle u_1(x,t) \rangle \bar{Z}. \end{cases} \quad (9)$$

Используя систему уравнений (9) выводятся следующие два уравнения для нахождения давления и средней продольной скорости

$$\frac{d^2 \bar{p}(x)}{dx^2} - \frac{i\omega 2h_0}{\delta E} \bar{Z} \bar{p}(x) = 0 \text{ и } \frac{d^2 \langle \bar{u}(x) \rangle}{dx^2} - \frac{i\omega 2h_0}{\delta E} \bar{Z} \langle \bar{u}(x) \rangle = 0. \quad (10)$$

При использовании условия гармонического колебания давления во входной и выходной частях канала, решение уравнения (10) определяется в следующем виде

$$\bar{p}(x,t) = \left[ \frac{p_1^0 \left( \text{Sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \left( \frac{L-x}{L} \right) \right) \right)}{\text{Sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \right)} + \frac{p_1^L \text{Sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} \frac{x}{L} \right)}{\text{Sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \right)} \right] e^{i\omega t}, \quad (11)$$

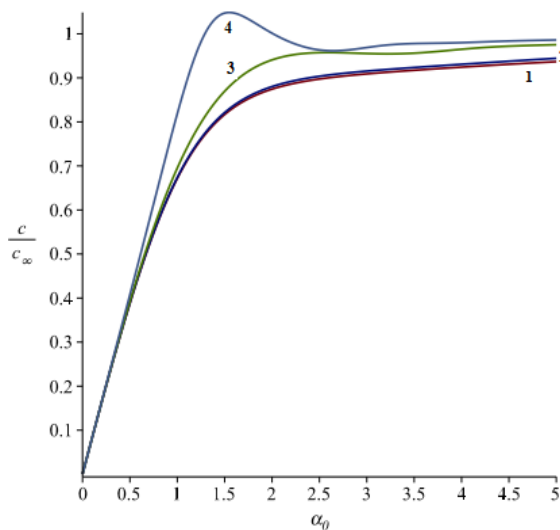
$$\langle \bar{u}(x) \rangle = \frac{h_0^2}{3\eta} \frac{\sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L}{h_0} \times p_1^0 \left[ \frac{\text{Ch} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \frac{L-x}{L} \right)}{\text{Sh} \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L} - \frac{p_1^L \text{Ch} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L \frac{x}{L} \right)}{p_1^0 \text{Sh} \sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L} \right]. \quad (12)$$

На основе полученных формул (11) и (12) показано, что мнимая часть  $\sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L$  аргумента определяет скорость распространения пульсовой волны давления, а действительная часть – затухание пульсовой волны. На основе этой формулы  $\sqrt{\frac{i\omega}{K}} \bar{Z} L$ , анализированы скорость распространения пульсовой волны давления и показатели затухания пульсовой волны. Показано, что при малых значениях коэффициента упругости, скорость распространения пульсовой волны давление в пульсовом течении вязкоупругой жидкости существенно не отличается от скорости распространения пульсовой волны

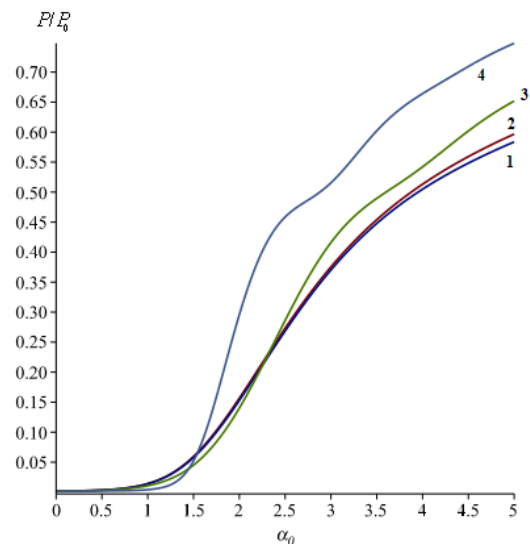
давления ньютоновской жидкости.

На рис. 1 показано изменение скорости распространения пульсовой волны давления в зависимости от параметра частоты колебания в пульсовом течении вязкоупругой жидкости, в различных значениях коэффициента упругости  $\alpha = 2$ ;  $EL = 0.001$ ;  $0.01$ ;  $0.1$ ;  $0.5$ .

Анализируя график на рис.1, можно установить, что изменение скорости распространения пульсовой волны в пульсовом потоке вязкоупругой жидкости в плоском канале с деформируемой стенкой существенно зависит от коэффициента упругости. Так как при меньших значениях коэффициента упругости при пульсовом течении вязкоупругой жидкости существенное отличие от скорости распространения пульсовой волны давления, сравнительно с ньютоновской жидкостью не наблюдается. а при больших значениях коэффициента упругости происходит увеличение скорости распространения пульсовой волны давления в вязкоупругой жидкости сравнительно ньютоновской.



**Рис. 1.** Изменение скорости распространения пульсового потока в зависимости от параметра частоты колебания в пульсовом течении вязкоупругой жидкости при значениях коэффициента упругости  $\alpha = 2$ ;  $EL = 0.001$ ;  $0.01$ ;  $0.1$ ;  $0.5$



**Рис. 2.** Изменение степени уменьшения амплитуды пульсовой волны  $P/P_0$  в зависимости от параметра частоты колебания в пульсовом потоке вязкоупругой жидкости, при значениях коэффициента упругости  $\alpha = 2$ ;  $EL = 0.001$ ;  $0.01$ ;  $0.1$ ;  $0.5$

На рис. 2 показано изменение показателя затухания амплитуды пульсовой волны давления в зависимости от параметра частоты колебания, при различных значениях коэффициента упругости  $\alpha = 2$ ;  $EL = 0.001$ ;  $0.01$ ;  $0.1$ ;  $0.5$ .

Из рис.2 из графиков видно, что степень уменьшения амплитуды пульсовой волны давления в зависимости от больших значений параметра

частоты колебания наблюдается увеличение ее степени, по сравнению с ньютоновской жидкостью.

Известно, что исследование изменения гидродинамического сопротивления в пульсовом потоке жидкости в зависимости от параметра частоты колебаний одним из важных факторов является реализация эффективности течения. Поэтому в данной работе характеристика изменения гидродинамического сопротивления в пульсовом потоке в зависимости от параметра частоты колебаний осуществляется с помощью изменения величины, выражаемой отношением градиента давления к расходу жидкости. Это соотношение выражается следующим образом:

$$\bar{z}^* = \left(-\frac{\partial p}{\partial x}\right) / R_0 \langle u \rangle = \frac{i\alpha_0^2 (M_1 - i\bar{M}_1) \cos(M_1 - i\bar{M}_1)}{3((M_1 - i\bar{M}_1) \cos(M_1 - i\bar{M}_1) - \sin(M_1 - i\bar{M}_1))} = \frac{1}{3}(\bar{R} + i\bar{L}). \quad (13)$$

Здесь коэффициенты  $M_1$  и  $\bar{M}_1$  являются коэффициентами, зависящими от коэффициента релаксации вязкоупругой жидкости и параметра частоты колебаний. С учетом того, что для ньютоновской жидкости эти коэффициенты изменяются только в зависимости от параметра частоты колебаний, они определяются следующими величинами:  $M_1 = \alpha_0 / \sqrt{2}$ ,  $\bar{M}_1 = \alpha_0 / \sqrt{2}$ . По полученной формуле (13) были проведены численные расчеты и исследовано изменение гидродинамического сопротивления в зависимости от параметра частоты колебаний для пульсовых течений ньютоновских и вязкоупругих жидкостей.

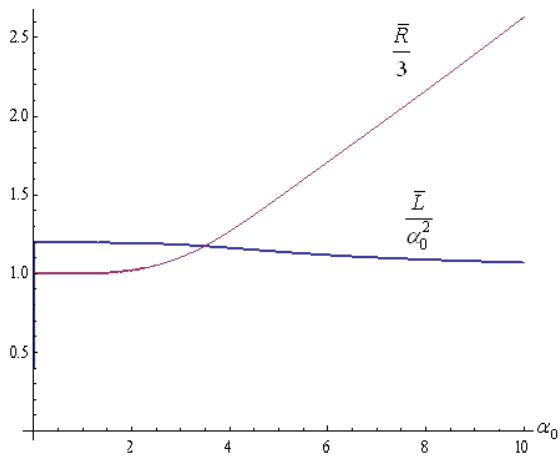


Рис. 3. Изменение гидродинамического сопротивления  $\bar{R}$  и индуктивности  $\bar{L}$  в зависимости от параметра частоты колебаний  $\alpha_0$  при значении упругого коэффициента  $EL=0,001$ ,  $\alpha=2$

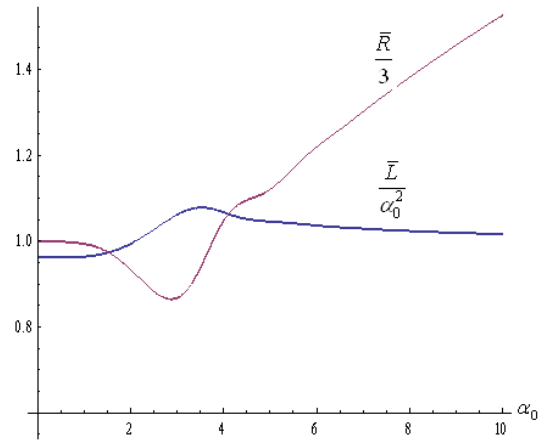


Рис. 4. Изменение гидродинамического сопротивления  $\bar{R}$  и индуктивности  $\bar{L}$  в зависимости от параметра частоты колебаний  $\alpha_0$  при значении упругого коэффициента  $EL=0,1$ ,  $\alpha=2$

При значениях числа упругости менее 0.05 изменение гидродинамического сопротивления в пульсовых течениях вязкоупругих жидкостей показано на рис. 3. Из этого графика следует, что можно использовать характеристики гидродинамического сопротивления в пульсовом течении ньютоновской жидкости для гидродинамического сопротивления вязкоупругой жидкости. При значениях параметра частоты

колебаний больше единицы наблюдалось уменьшение изменения гидродинамического сопротивления в колеблющемся потоке вязкоупругой жидкости сравнительно ньютоновской (рис. 4). При этом установлено, что состояние максимального снижения гидродинамического сопротивления соответствует промежуточным значениям  $2 \leq \alpha_0 \leq 4$  параметра частоты колебания.

Третья глава диссертации «Пульсовое течение вязкоупругой жидкости в цилиндрической трубе с деформируемой стенкой» посвящена пульсовому течению вязкоупругой жидкости, когда разность давлений между входной и выходной частями в достаточно длинной цилиндрической трубе изменяется по синусоидальному закону колебаний в одном и том же фазе. При этом ось  $x$  направлена вдоль оси цилиндра, переменная радиуса трубы обозначается  $r$ , а средний радиус трубы –  $R$ . Поскольку длина трубы достаточно велика по сравнению с её радиусом, отношение поперечной скорости к продольной скорости и число Рейнольдса считаются достаточно малыми. Для этого случая система дифференциальных уравнений, характеризующая пульсовое движение вязкоупругой жидкости в цилиндрической трубе, выражается в следующем упрощенном виде:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rx}), & \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r} + \frac{\mathcal{G}_r}{r} = 0, \\ (p - p_c) = \frac{E \delta u_r}{R^2 (1 - \nu_1^2)}, \\ \tau_{rx} = \sum_{k=1}^{\infty} \tau_{k,rx}, & \lambda_k \frac{\partial \tau_{k,rx}}{\partial t} + \tau_{k,rx} = \eta_k \frac{\partial \mathcal{G}_x}{\partial r}. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь  $\rho$  - плотность;  $\mathcal{G}_x$ ,  $\mathcal{G}_r$  - продольная и поперечная скорость;  $p$ ,  $p_c$  - внутреннее, внешнее давление;  $\tau_{rx}$  - касательное напряжение;  $E$  - коэффициент упругости;  $u_r$  - деформация трубы по поперечному сечению;  $\lambda_k = \frac{\lambda}{k^\alpha}$  - коэффициент релаксации упругой жидкости;  $\eta_k = \frac{\eta}{\xi(\alpha) k^\alpha}$  - коэффициент динамической вязкости упругой жидкости;  $\delta$  - средняя толщина стенки трубы;  $\xi(\alpha) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^\alpha}$  - дзета функции Римана;  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $t$  - время;  $R$  - радиус в невозмущенном состоянии трубы.

Поскольку рассматриваемая задача имеет вид пульсового потока, решение системы уравнений (14) и переменные неизвестные функции ищутся в экспоненциальном виде по времени следующим образом:

$$\begin{cases} \mathcal{G}_x(x, r, t) = \bar{\mathcal{G}}_{0x}(r) + \bar{\mathcal{G}}_x(x, r) e^{i\omega t}, & \mathcal{G}_r(x, r, t) = \bar{\mathcal{G}}_r(x, r) e^{i\omega t}, \\ \tau_{rx}(x, r, t) = \bar{\tau}_0(r) + \bar{\tau}_{rx}(x, r) e^{i\omega t}, & p(x, t) = p_0(x) + \bar{p}(x) e^{i\omega t}. \end{cases} \quad (15)$$

Граничные условия для решения системы уравнений (14) задаются в

виде

$$\begin{cases} \mathcal{G}_x = 0, \mathcal{G}_r = \frac{\partial u_r}{\partial t} \text{ при } r = R, \\ \mathcal{G}_x < \infty, \mathcal{G}_r = 0 \text{ при } r = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Подставив выражение неизвестных в виде (15) в систему уравнений (14), система уравнений (14) сводится к виду системы двух уравнений. Первая система уравнений представляет собой систему уравнений, выражающую стационарное течение в трубе, решение которой определяется формулой Пуазеля. А вторая система уравнений представляет собой систему уравнений пульсового течения вязкоупругой жидкости в трубе с деформируемой стенкой и представляется в следующем виде

$$\begin{cases} \rho i \omega \bar{\mathcal{G}}_x = \left( -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\tau}_{rx}), \frac{\partial \bar{\mathcal{G}}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\mathcal{G}}_r}{\partial r} + \frac{\bar{\mathcal{G}}_r}{r} = 0, \\ \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} = 0, \quad i \omega \bar{p} = \frac{E \delta \bar{\mathcal{G}}_r}{R^2 (1 - \nu_1^2)}, \\ \bar{\tau}_{rx} = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{\tau}_{k,rx}, \quad i \omega \lambda_k \bar{\tau}_{k,rx} = \eta_k \frac{\partial \bar{\mathcal{G}}_x}{\partial r}. \end{cases} \quad (17)$$

Эта система уравнений имеет вид после некоторых вычислений

$$\frac{d^2 \bar{\mathcal{G}}_x}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \bar{\mathcal{G}}_x}{dr} - \frac{\rho(i\omega)}{\bar{\eta}(i\omega)} \bar{\mathcal{G}}_x = -\frac{1}{\bar{\eta}(i\omega)} \left( -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right), \quad (18)$$

здесь

$$\bar{\eta}(i\omega) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\eta_k}{(1 + i\omega \lambda_k)}, \quad \eta_k = \frac{\eta}{\xi(\alpha) k^\alpha}, \quad \lambda_k = \frac{\lambda}{k^\alpha}.$$

Поскольку полученное уравнение (18) является уравнением Бесселя, его решение находится с помощью функций Бесселя, на основе заданных граничных условий, в следующем виде

$$\bar{\mathcal{G}}_x(x, r, t) = \frac{1}{\rho i \omega} \left( -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) \left( 1 - \frac{J_0 \left( i^{3/2} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*(i\omega)} R} r \right)}{J_0 \left( i^{3/2} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*(i\omega)}} \right)} \right) e^{i\omega t}. \quad (19)$$

Используя полученное уравнение (19) выводится следующее уравнение, связывающее усредненную продольную скорость с градиентом давления

$$\frac{d\bar{p}}{dx} = -\bar{Z} \langle \mathcal{G}_x(x) \rangle. \quad (20)$$

Здесь

$$\bar{Z} = \left( \frac{1}{\rho i \omega} \left( 1 - \frac{2J_1 \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*(i\omega)}} \right)}{i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*(i\omega)}} J_0 \left( i^{\frac{3}{2}} \alpha_0 \sqrt{\frac{1}{\eta^*(i\omega)}} \right)} \right) \right)^{-1}.$$

Уравнение (20) можно рассматривать как уравнение, связывающее усредненную продольную скорость с градиентом давления. Поскольку в этом уравнении две неизвестные и число уравнений состоит из одного уравнения, второе уравнение формируется с помощью уравнения неразрывности в следующем виде

$$\frac{d \langle \varrho_x(x) \rangle}{dx} = -\frac{\bar{p} i \omega}{\bar{a}^*}, \text{ здесь } \bar{a}^* = \frac{E \delta}{2R(1-\nu_1^2)}. \quad (21)$$

Дифференцируя обе части уравнения (20) по переменной  $x$ , путем применения к нему уравнения (21), было получено следующее уравнение:

$$\frac{d^2 \bar{p}(x)}{dx^2} - \frac{i\omega}{\bar{a}^*} \bar{Z} \bar{p} = 0. \quad (22)$$

Решение этого уравнения определялось на основе следующих граничных условий

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \bar{p}^0 e^{i\omega t} \text{ когда } x=0, \quad \bar{p} = \bar{p}^L e^{i\omega t} \text{ когда } x=L, \\ \bar{p}_1(x,t) &= \left[ \frac{p^0 \left( \text{sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \left( \frac{L-x}{L} \right) \right) \right)}{\text{sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \right)} + \frac{p^L \text{sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \frac{x}{L} \right)}{\text{sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \right)} \right] e^{i\omega t}. \end{aligned} \quad (23)$$

Используя полученную формулу (23), была определена следующая формула для распределения средней продольной скорости из уравнения (20)

$$\langle \varrho_x(x,t) \rangle = \frac{R^2}{8\eta} \frac{\sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L}{L} \left[ \frac{p^0 \text{ch} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \left( \frac{L-x}{L} \right) \right)}{\text{sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \right)} - \frac{p^L \text{ch} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \frac{x}{L} \right)}{\text{sh} \left( \sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L \right)} \right] e^{i\omega t}. \quad (24)$$

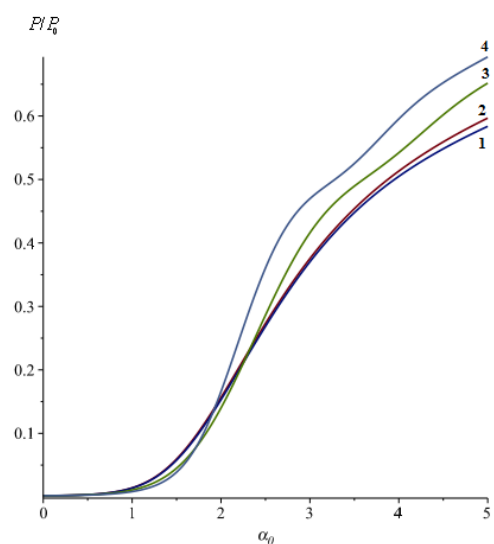
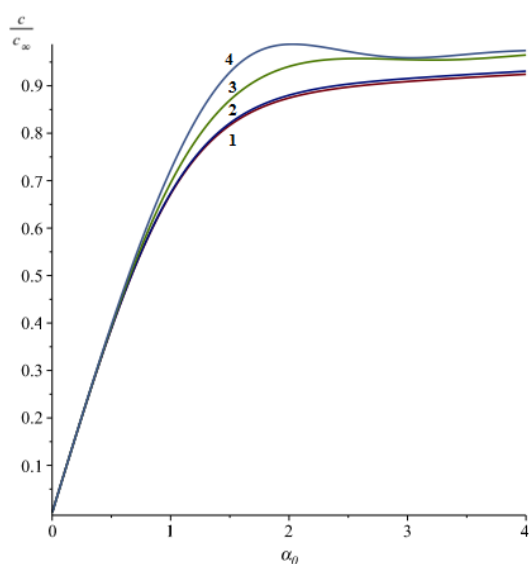
Из формул (23) и (24), приравняв коэффициент релаксации к нулю получены формулы для пульсового течения ньютоновской жидкости. С помощью этих формул можно сравнить результаты исследования ньютоновской жидкости с результатами вязкоупругой жидкости в цилиндрической трубе.

Из решения (23) и (24) видно, что в результате решения задачи о пульсовом течении вязкоупругой жидкости в цилиндрической трубе существенно зависит от параметра  $\sqrt{\frac{i\omega}{\bar{a}^*}} \bar{Z} L$ . Таким образом, в результате разделения действительной и мнимой частей этого параметра было определено, что его действительная часть характеризует степень затухания

пульсовой волны, а мнимая часть характеризует скорость распространения пульсовой волны. Поскольку в состав параметра  $\sqrt{\frac{i\omega}{a^*} \bar{Z} L}$  входят функции

Бесселя с комплексными аргументами, и из-за отсутствия возможности разделить его действительную и мнимую части в общем виде, результаты расчетов анализировались с использованием асимптотических формул в малых и больших значениях абсолютных значений аргумента функции Бесселя.

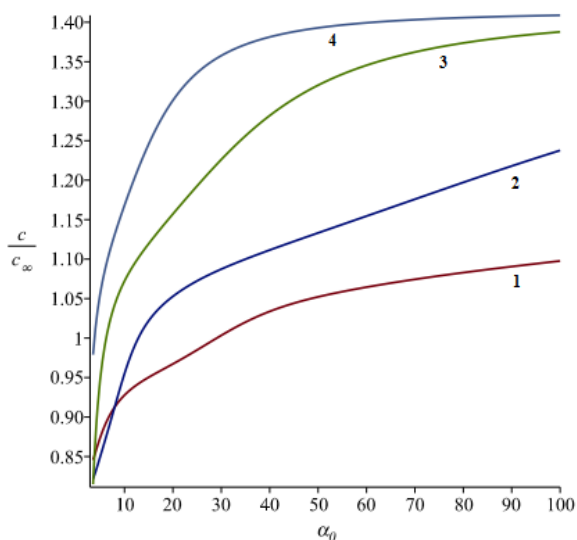
Для расчета значений функций Бесселя при малых значениях абсолютного значения аргумента использовались их значения разложением по ряду. В результате этого, изменение скорости распространения пульсовой волны давления и степень затухания по отношению длины волны в зависимости от параметра частоты колебаний при пульсовом течении вязкоупругой жидкости в цилиндрических трубах с деформируемой стенкой, изображены на рисунках 5 и 6. По графикам рисунков 5 и 6 определено, что при пульсовом течении вязкоупругой жидкости в цилиндрической трубе с деформируемой стенкой скорость распространения пульсовой волны и степень затухания по отношению с длиной волны при значениях параметр частоты колебаний в отрезке  $0 \leq \alpha_0 \leq 4$  характеристический вязкоупругой жидкости практически не влияет на поток. На основе этого, при наборе значении параметра частоты колебаний в отрезке  $0 \leq \alpha_0 \leq 4$  для пульсового течения вязкоупругой жидкости можно использовать результаты ньютоновской жидкости.



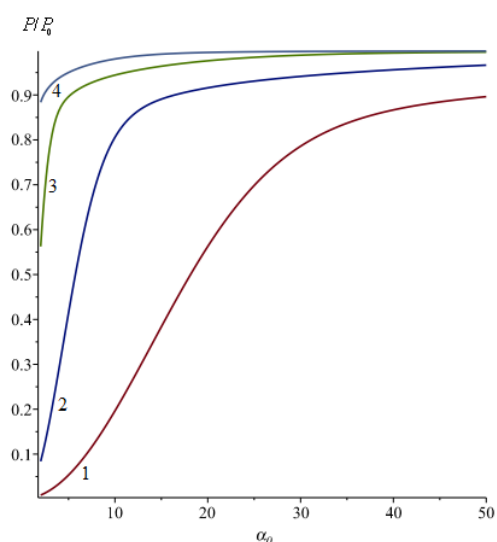
**Рис. 5.** Изменение скорости распространения пульсовой волны при течении вязкоупругой жидкости в зависимости от параметра частоты колебаний в промежутке  $0 \leq \alpha_0 \leq 4$  (при различных значениях коэффициента упругости 1-EL=0.001; 2-EL=0.01; 3-EL=0.1; 4-EL=0.5).

**Рис. 6.** Изменение степени затухания волны, в пульсовом течении вязкоупругой жидкости в зависимости от параметра частоты колебаний в промежутке  $0 \leq \alpha_0 \leq 4$  (при различных значениях коэффициента упругости 1-EL=0.001; 2-EL=0.01; 3-EL=0.1; 4-EL=0.5).

Приведены результаты расчета пульсового течения вязкоупругой жидкости в цилиндрических трубах с деформируемыми стенками при больших значениях \ аргумента. При этом использованы асимптотические формулы, соответствующие большим значениям аргумента, и на рис 7 построены соответствующие графики. Из графиков на рис. 7 видно, что скорость распространения пульсовой волны асимптотически увеличивается при значениях параметра частоты колебаний в диапазоне  $4 \leq \alpha_0 < \infty$ . Судья по этому графику установлено, что увеличение скорости распространения пульсовой волны при больших значения параметра частоты колебаний в пульсовом течении вязкоупругой жидкости в несколько раз выше чем распространение пульсовой волны, характерное для ньютоновской жидкости.



**Рис.7.** Изменение скорости распространения пульсовой волны течения вязкоупругой жидкости в цилиндрической трубе с деформируемыми стенками в зависимости от больших значений параметра частоты колебаний (при различных значениях коэффициента упругости 1-EL=0.001; 2-EL=0.01; 3-EL=0.1; 4-EL=0.5;  $\alpha = 2$ ).



**Рис. 8.** Изменение степени затухания волны в пульсовом течении вязкоупругой жидкости в зависимости параметра частоты колебаний в промежутке  $4 \leq \alpha_0 \leq \infty$  (при различных значениях коэффициента упругости 1-EL=0.001; 2-EL=0.01; 3-EL=0.1; 4-EL=0.5;  $\alpha = 2$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по диссертационной работе на тему «Исследование пульсового течения вязкоупругой жидкости в трубах и каналах с деформируемыми стенками» получены следующие выводы.

1. Для исследования задачи о пульсовых течениях вязкоупругих жидкостей в плоских каналах и цилиндрических трубах с деформируемыми стенками были сформулированы контактные задачи путем систематизации дифференциального уравнения деформирования стенки, реологического уравнения вязкоупругой жидкости и дифференциального уравнения движения жидкости. Для решения этих задач представлены граничные условия.

2. При решении задач пульсового течения вязкоупругой жидкости в плоском канале с деформируемыми стенками представлены графики изменения скорости распространения пульсовой волны давления и степени затухания амплитуды волны в зависимости от параметра частоты колебаний, при различных значениях коэффициента упругости.

3. Исследовано изменение гидродинамического сопротивления в пульсовом течении вязкоупругой жидкости в плоском канале с деформируемыми стенками. Показано, что гидродинамическое сопротивление при малых значениях параметра частоты колебаний в пульсовом течении вязкоупругой жидкости практически не отличается от пульсового течения ньютоновской жидкости. При больших значениях параметра частоты колебаний на графике изменения гидродинамического сопротивления наблюдается снижение и его максимальное снижение наступает в промежуточных значениях  $2 \leq \alpha_0 \leq 4$  параметра частоты колебания в зависимости от значения коэффициента упругости.

4. При малых значениях параметра частоты колебания установлено, что характеристики пульсового течения, учет упругости жидкости практически не влияют на скорость распространения пульсовой волны давления и степень затухания амплитуды волны. В таких случаях показано, что вместо результатов расчета пульсового течения вязкоупругой жидкости в цилиндрической трубе с деформируемыми стенками можно получить результаты расчета пульсового течения ньютоновской жидкости.

5. Показано, что при больших значениях параметра частоты колебания скорость распространения пульсовой волны давления и степень затухания амплитуды волны в пульсовом течении вязкоупругой жидкости существенно отличаются от результатов расчета пульсового течения ньютоновской жидкости, и в таких случаях необходимо обратить особое внимание на результаты расчета пульсового течения вязкоупругой жидкости в цилиндрической трубе и в плоском канале с деформируемыми стенками.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
SCIENCES DSc.03/2025.27.12.FM/T.09.03 UNDER  
SAMARKAND STATE UNIVERSITY  
NAMED AFTER SHAROF RASHIDOV**

---

**URGENCH STATE UNIVERSITY NAMED AFTER ABU RAYHON  
BERUNI**

**ABDIKARIMOV NABIJON IBADULLAYEVICH**

**STUDIES ON THE PULSATILE FLOW OF VISCOELASTIC FLUIDS IN  
PIPES AND CHANNELS WITH DEFORMABLE WALLS**

**01.02.05 - Fluid and gas mechanics**

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

**Samarkand- 2026**

**The topic of the dissertation of the doctor of Philosophy (PhD) is registered in the Higher Attestation Commission under the Cabinet of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan for № B2024.2.PhD/FM1078.**

The dissertation has been prepared at Urgench State University named after Abu Rayhon Beruniy.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website ([www.samdu.uz](http://www.samdu.uz)) and the “Ziyonet” Information and educational portal ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific adviser:**

**Navruzov Kuralbay**

Doctor of physical and mathematical sciences,  
professor

**Official opponents:**

**Mahmudov Jamol Mahmud ugli,**

Doctor of physical and mathematical sciences,  
docent

**Kholiyarov Erkin Chorshanbiyevich,**

Candidate of physical and mathematical sciences,  
docent

**Leading organization:**

**Institute of mechanics and seismic stability of  
structures named after M.T. Urazbaev**

Defense will take place «17» April 2026 at 15-00 at the meeting of Scientific Council number DSc.03/2025.27.12.FM/T.09.03 at Samarkand State University named after Sharaf Rashidov. (Address: University str. 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, tel.: (+99866) 239-11-40, fax: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: [devonxona@samdu.uz](mailto:devonxona@samdu.uz)).

Dissertation is possible to review in Information-resource center at Samarkand State University named after Sharaf Rashidov (is registered № 108) (Address: University str. 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, tel: (+99866) 239-11-40).

Abstract of dissertation sent out on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 year

(Mailing report № \_\_\_\_\_ on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 year)



*[Handwritten signatures in blue ink]*

**R.I. Khalmuradov**

Chairman of scientific council  
on award of scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, Professor

**U.A. Nishonov**

Scientific secretary of scientific council  
on award of scientific degrees,  
Doctor of philosophy (PhD) in physical  
and mathematical sciences

**B.Kh. Khuzhayorov**

Chairman of scientific seminar under scientific  
council on award of scientific degrees,  
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aims of research work** is to formulate pulse flows of viscoelastic fluids in channels and cylindrical pipes with deformable walls using models of non-Newtonian fluids and taking into account wall deformation based on the creation of contact problems and their analytical solution.

**The object of the research work** is the pulse flow of viscoelastic fluid in channels and cylindrical pipes with deformable walls.

**Scientific novelty of research work consists of the followings:**

improved rheological models of classical viscoelastic fluids have been developed for the inhomogeneous case; based on these, the fundamental differential equations of motion have been formulated, and simplified solutions for the problems of pulsating flow of viscoelastic fluids through pipelines have been proposed;

new problems of pulsating viscoelastic fluid flow in channels and cylindrical pipes with deformable walls have been formulated under corresponding boundary conditions; through their analytical solution, calculation formulas have been derived to determine velocity distribution, fluid flow rate, and transfer function dynamics;

the nature of hydrodynamic resistance variation as a function of oscillation frequency in the pulsating flow of viscoelastic fluids has been identified. It is scientifically substantiated that resistance decreases within a specific frequency range due to the manifestation of the fluid's elastic properties;

regularities in the variation of pulse wave propagation speed and decay decrements along the deformable walls of channels and cylindrical pipes have been established under the influence of the rheological characteristics of the viscoelastic fluid;

a method for determining the pipe wall elasticity coefficient has been developed by measuring the propagation speed of the pulse wave in deformable pipes.

**Implementation of research results.** Based on a study of the pulse viscosity of viscoelastic fluids in deformable pipes:

methods for modeling the pulsating motion of blood in arterial vessels and solving corresponding hydrodynamic problems were utilized within the framework of the fundamental project OT-F4-04(05) “Applications of the spectral method to solving matrix nonlinear evolutionary equations, biomechanics of the cardiovascular system,” carried out at Urgench State University in 2017–2020 (Reference No. 02-84/5 of Urgench State University, dated April 30, 2025). As a result, it enabled the determination of hydrodynamic resistance in arterial vessels

based on the laws of propagation and attenuation of pulse waves obtained using software tools for mathematical modeling of the arterial system;

algorithms for solving problems of pulsating flow of viscoelastic fluids in deformable pipes and channels were utilized in the applied project OT-Atex-2018-340 “Theoretical and numerical research of applied geophysical problems of the dynamics of two-velocity media,” carried out at Karshi State University in 2018–2020 (Reference No. 03/672 of Karshi State University, dated March 9, 2024). As a result, it enabled numerical modeling of wave processes in complex hydrodynamic systems and analysis of fluid transport efficiency in pipes with elastic walls.

**Publication of research results.** On the topic of the dissertation, 19 scientific works have been published, 9 of which are included in the list of scientific publications proposed by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the results of dissertations, including 3 published in foreign and 6 in national scientific journals.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation is composed of an introduction, three chapters, conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 110pages.

**E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I-bo'lim (I часть; I part)**

1. K.Navruzova., N.I.Abdikarimova., J.Jumayev, Transient processes during nonstationary flow of an elastic-viscous liquid in a flat channel// Russian mathematics, 2025, vol. 69, no. 3, PP. 24–36.

<https://doi.org/10.3103/S1066369X25700227> (№3 Scopus, IF= 1.0).

2. Наврузов К., Абдикаримов Н. Математическое моделирование гидродинамических сопротивлений при колебательном течении упруговязкой жидкости в плоском канале// Математическое моделирование и численные методы, 2024, № 2, с. 35–45. (01.00.00, №30).

3. К.Наврузов.,З.Шукуров., М.Тураев., Н. Абдикаримов .Ламинарное нестационарное течение вязкоупругой жидкости в плоском канале // Механика muammolari, 2024, №1.-С.60-68. (01.00.00, №4)

4. Navruzov K., Abdikarimov N., Xayitboyev Q. Yassi kanalda siqilmaydigan reologik murakkab suyuqliklarning laminar tebranma oqimi // Ilm sarchashmalari 2024, №2.-С.18-24. (01.00.00, №12).

5. Abdikarimov N., Aqmonova L., Begjanov A. Yassi kanalda reologik murakkab suyuqliklarning tebranma oqimidagi gidrodinamik qarshilikni matematik modellashtirish // Ilm sarchashmalari, 2023, №11.–С. 12-17. (01.00.00, №12).

6. Abdikarimov N.I. Двух жидкостной модели вязкой и вязкоупругой жидкости // Ilm sarchashmalari, 2023, №12/1.–С. 35-39. (01.00.00, №12).

7. Наврузов К., Мирзоев А.А., Абдикаримов Н.И., Шарипова Ш.Б. Пульсовое течение вязкой жидкости в плоском канале с проницаемыми стенками // Farg'ona politexnika instituti ilmiy-texnika jurnal, 2022, Tom-26, №6.–С. 23-31. (05.00.00, №20).

8. Наврузов К., Абдикаримов Н. Колебательное течение вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале при заданном гармоническом колебании расхода// Farg'ona politexnika instituti ilmiy-texnika jurnal, 2022, Tom-26, №4.-С. 9-17. (05.00.00, №20).

9. Navruzov K., Sharipova Sh., Abdikarimov N. Pulsatic flow of fluid in a flat channel with conductor wall // International scientific journal Science and innovation. 2022-5, 180-190-bb. <https://doi.org/10.5281/zenodo.70292174>. (№2, Journal Impact Factor, IF= 8.2).

**II-bo'lim (II часть; II part)**

10. NavruzovK., Abdikarimov N.I., BegjanovA.Sh., Yusupov Sh. Examining laminar, non-stationary viscoelastic fluid flow between two parallel planes // BIO Web of Conferences 105, 05005, AEGISD-IV 2024 <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410505005> (№3 Scopus, IF= 1.89).

11. Navruzov K., Abdikarimov N.I., Z.Shukurov., M.Turayev “Laminar unsteady flow of a viscoelastic liquid in a flat channel” E3S Web of Conferences 587, 01014, 2024 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458701014> (№3 Scopus, IF= 1.89).

12. Navruzov K., Abdikarimov N.I., Rajabov S., Turdimurodov O., Nasrulloeva R “Non-stationary flow of viscoelastic fluid in a cylindrical pipe”. E3S Web of Conferences 587, 01013, 2024 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458701013> (№3 Scopus, IF= 1.89).

13. Navruzov K., Abdikarimov N., Rajabov S., Turdimurodov O., Nasrulloeva R “Study of non-stationary flow of viscoelastic incompressible fluid in a flat channel”. E3S Web of Conferences 587, 01012, 2024 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458701012> (№3 Scopus, IF= 1.89).

14. Наврузов К., Шарипова Ш.Б., Абдикаримов Н.И. Пульсирующие течения вязкой несжимаемой жидкости в круглой цилиндрической трубе с упругими стенками // Актуальные задачи математики, механики информатики. Материалы Международной научной конференции посвященной 80-летию профессора Т.Г.Мустафина, 2022, 8-9 сентябрь, Караганда, С. 243-244.

15. Наврузов К., Абдикаримов Н.И., Шарипова Ш.Б. Колебательное течение вязкой жидкости в плоском канале при заданном гармоническом колебании расхода // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики, 2022, 12-14 декабрь, Воронеж, С. 74-79.

16. Наврузов К., Абдикаримов Н.И. Обобщенная модель максвелла для двух жидкостных смесей // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве, 2023, 8 ноября, Санкт-Петербург. С.71-73.

17. Наврузов К., Абдикаримов Н.И., Шарипова Ш.Б., Бегжанов А.Ш. Касательное напряжение сдвига при колебательном течении вязкоупругой несжимаемой жидкости в плоском канале // International Conference Mathematical analysis and its applications in modern mathematical physics, 2022, 23-24 September, Samarkand (Uzbekistan) С.37-38.

18. Наврузов К., Абдикаримов Н.И. Математическое моделирование гидродинамического сопротивления при колебательном течении вязкоупругой жидкости в плоском канале // Современные проблемы дифференциальных уравнений и их приложения Международная научная конференция. 2023, 23-24 ноября, Тошкент. С. 167-168.

19. Наврузов К., Абдикаримов Н.И. Пульсовое течение вязкой несжимаемой жидкости в трубе с упругими стенками // *Mexanika va matematikaning amaliy muammolari* 2024, 17-18-may, Toshkent (O'zbekiston)- С.372-375

Aftoreferat Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining  
“SamDU ilmiy tadqiqotlar axborotnomasi” jurnali tahririyatida  
tahrirdan o‘tkazildi ( \_\_. \_\_.2026 yil).

Guvohnoma: № \_\_\_\_\_

2026 yil \_\_\_\_\_ bosishga ruxsat etildi:  
Ofset bosma qog‘ozi. Qog‘oz bichimi 60×84<sub>1/16</sub>.  
“Times” garniturası. Ofset bosma usuli.  
Hisob-nashiriyot t.: 2,8. Shartli b.t. 2,1.  
Adadi \_\_\_ nusxa. Buyurtma № \_\_\_\_\_.

---

\_\_\_\_\_ nashr-matbaa markazida chop etildi.  
Manzil: Samarqand sh, \_\_\_\_\_.

