

**“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY  
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/26.05.2022.T.10.05 RAQAMLI ILMIY  
KENGASH ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

---

**“TOSHKENT IRRIGATSIYA VA QISHLOQ XO‘JALIGINI  
MEXANIZATSIYALASH MUHANDISLARI INSTITUTI”  
MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI**

**TURAYEV FOZILJON JURAQULOVICH**

**ICHIDAN SUYUQLIK OQIB O‘TAYOTGAN QOVUSHQOQ-ELASTIK  
QUVURLARNING TEBRANISH JARAYONINI MATEMATIK  
MODELLASHTIRISH**

05.01.07 – “Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui”  
01.02.04 – “Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi”

FIZIKA-MATEMATIKA fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
**AVTOREFERATI**

Toshkent - 2025

**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) of  
physical and mathematical sciences**

**Turayev Foziljon Juraqulovich**

Ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan qovushqoq-elastik quvurlarning tebranish jarayonini matematik modellashtirish ..... 3

**Тураев Фозилжон Журакулович**

Математическое моделирование колебательных процессов вязкоупругих трубопроводов с протекающей жидкостью..... 21

**Turaev Fozilzhon Zhurakulovich**

Mathematical modeling of oscillatory processes in viscoelastic pipelines with flowing fluid..... 42

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 46

**“TIQXMMI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY  
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/26.05.2022.T.10.05 RAQAMLI ILMIY  
KENGASH ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

---

**“TOSHKENT IRRIGATSIYA VA QISHLOQ XO‘JALIGINI  
MEXANIZATSIYALASH MUHANDISLARI INSTITUTI”  
MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI**

**TURAYEV FOZILJON JURAQULOVICH**

**ICHIDAN SUYUQLIK OQIB O‘TAYOTGAN QOVUSHQOQ-ELASTIK  
QUVURLARNING TEBRANISH JARAYONINI MATEMATIK  
MODELLASHTIRISH**

05.01.07 – “Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui”

01.02.04 – “Deformatsiyalanuvchan qattiq jism mexanikasi”

FIZIKA-MATEMATIKA fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
**AVTOREFERATI**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.4.PhD/T1117 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya "Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" Milliy tadqiqot universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy Kengashning veb-sahifasida (<http://tiame.uz>) va "Ziyonet" Axborot ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbarlar:**

**Mirsaidov Mirziyod Mirsaidovich**

O'zR FA akademigi, texnika fanlari doktori, professor

**Xudayarov Baxtiyar Alimovich**

texnika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Safarov Ismoil Ibrohimovich**

fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Rahmonov Zafar Ravshanovich**

fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot**

Toshkent davlat transport universiteti

Dissertatsiya himoyasi "Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/26.05.2022.T.10.05 raqamli Ilmiy Kengash asosidagi bir martalik Ilmiy Kengashning 2025-yil "31" "10" soat 14:00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100000, Toshkent shahri, Mirzo Ulug'bek tumani, Qori-Niyoziy ko'chasi, 39-uy)

Dissertatsiya ishi bilan "Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" Milliy tadqiqot universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (384 raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100000, Toshkent shahri, Mirzo Ulug'bek tumani, Qori-Niyoziy ko'chasi, 39-uy)

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "18" oktyabr kuni tarqatildi.  
(2025-yil "17" oktyabr dagi № 1 raqamli reestr bayonnomasi)



*Handwritten signature*

**N.S. Mamatov**

Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy Kengash raisi,  
texnika fanlari doktori, professor

*Handwritten signature*

**D.Q. Bekmurotov**

Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy Kengash ilmiy kotibi,  
texnika fanlari falsafa doktori (PhD)

*Handwritten signature*

**G.U. Jo'rayev**

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

## KIRISH (falsafa doktori PhD dissertatsiyasi annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati.** Jahonda gaz, neft va neft mahsulotlarini quvur orqali transportirovka qilish mamlakatlar iqtisodiyot tarmoqlarining jadal rivojlanishining muhim ko'rsatkichlaridan biri hisoblanadi. Iqtisodiy tejamkorligi, ekologik xavfsizligi va belgilangan sanoat ob'yektlariga gaz va neft mahsulotlarini uzluksiz ta'minlashi bilan quvur transporti boshqa transport turlaridan farq qiladi. Quvur transportirovkasi jarayonida turli tashqi va ichki ta'sirlar yordamida quvurlarda ro'y beradigan tebranish jarayonlari tasodifiy halokatlarni keltirib chiqarishi mumkin. Natijada, soha ob'yektlari katta iqtisodiy zarar ko'rishi, atrof-muhit ekologiyasi buzilishiga olib keladi, shuningdek insonlar hayotiga ham xavf solishi mumkin. Shu sababli, silindrik quvurlar jarayonini tadqiq qilish dolzarb masalalardan biri bo'lib qolmoqda. Texnik konstruksiyalarning uzluksiz o'zgarib borishi, murakkablashuvi va materiallar sanoatining taraqqiyoti matematik modellashtirish nazariyasi va amaliyotining rivojlanishi uchun muhim ahamiyat kasb etadi. Bu jarayonlar uchun misol sifatida katta oqim sharoitiga mo'ljallangan yupqa devorli konstruksiyalarni, jumladan gaz va neft quvurlarini texnologik loyihalash jarayonining murakkablashuvi va ishlab chiqarishni misol qilib ko'rsatish mumkin. Yangi xil ko'rinishdagi, jumladan kompozitsion materiallarni yaratish va qo'llash bu yo'nalishda yetarlicha rivojlanish omilidir. Dunyo mamlakatlari AQSh, Rossiya, Kanada, Yevropa va Osiyoning rivojlangan davlatlari tadqiqotchilari tomonidan suyuqlik transportirovka qiluvchi silindrik kompozitsion quvurlarning qovushqoq-elastiklik xususiyatini hisobga olgan holda tebranish jarayonini tadqiq qilishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda katta diametrli 10 MPadan ortiq ichki bosimga ega yupqa devorli quvurlarni sterjen yoki balka ko'rinishda emas, balki silindrik qobiq sifatida tekshirish bo'yicha keng qamrovli ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Katta diametrli silindrik quvurlarni tadqiq qilish uchun konstruksiyadagi ichki va tashqi muhitning o'zaro ta'siri hisobga olingan holda yupqa qobiqlar nazariyasi qo'llanilmoqda. Silindrik qobiq tipidagi kompozitsion quvurlarning tebranish jarayonlaridagi murakkab ish hajmlari bo'yicha masalalarni yechishda matematik modellashtirish usullarini qo'llash muhim vositadir. Quvurlar materialining qovushqoq-elastiklik xossalarini e'tiborga olish amaliy natijalarni aniqligini oshiradi. Shu bilan birga kuchlanish va deformatsiya komponentlari orasidagi maxsuslikni, ya'ni materialning qovushqoq-elastiklik xossalarini inobatga olib, gaz va neft quvurlarining silindrik qobiq ko'rinishida qarab, chiziqli va nochiziqli dinamik masalalarning yangi matematik modelini qurish hamda sonli yechish algoritmini va kompyuter dasturlarni yaratish bugungi kundagi dolzarb muammolardan biridir.

Respublikamizda kimyo sanoati, neft-gaz tarmoqlari va uy-joy kommunal xo'jaligida kompozitsion va polimer-kompozitsion quvurlar sistemasini loyihalash va barpo etishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Ushbu maqsadlarni amalga oshirishda O'zbekiston Respublikasi Prezidentining qarorida, jumladan "...ichimlik suvi, oqova suv tarmoqlarini...", "... tabiiy gaz tarmoqlarini qurish,

rekonstruksiya qilish va ta'mirlash ishlari ..."<sup>1</sup> vazifalari belgilab berilgan. Mazkur vazifani amalga oshirishda, jumladan neft-gaz sanoati tarmoqlari, aholini suv bilan ta'minlash korxonalarini va gidrotexnik inshootlarning suv chiqarish quvurlarining tebranish jarayoni muammolarini hal etishning dinamik usullari, algoritmlari va hisoblash dasturlarini ishlab chiqish muhim ilmiy ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni, 2020-yil 7-maydagi PQ-4708-son "Matematika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy-tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida", 2019-yil 11-noyabrdagi PQ-4522-son "Neft va gaz geologiya-qidiruv ishlarini tashkil etish va olib borish tizimini takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida", 2017-yil 25-sentyabrdagi "Suv ob'yektlarini muhofaza qilish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida" PQ-3286-son qarorlari hamda mazkur faoliyatlarga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

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

**Muammoni o'rganilganlik darajasi.** So'nggi yillarda elastik silindrsimon qobiqlar ko'rinishidagi quvurlardagi tebranish jarayonlarini o'rganishga bag'ishlangan ishlar olib borilmoqda, shu jumladan, M.P.Païdoussis, R.A.Ibrahim, Marco Amabili, V.V.Bolotin, M.A.Ilgamov, A.S.Volmir, M.S.Grach, S.G.Shulman, I.S.Fang, I.A.Xarings, E.I.Niordson, I.P.Denis, D.S.Uiver va T.E.Anni ilmiy ishlarida. Respublika olimlaridan T.Rashidov, T.Shirinqulov, F.Badalov, X.Eshmatov, M.Mirsaidov, K.Sultonov, I.I.Safarov, X.Xudaynazarov, T.Mavlyanov, B.A.Xudayarov, R.A.Abdikarimov, M.Q.Usarov, Sh.Bobonazarovlar sterjen va silindrik tipidagi elastik va qovushqoq-elastik quvurlarning tebranishi va mustahkamligi bilan bog'liq bo'lgan masalalar va ularning yechimlari ustida izlanishlar olib borganlar.

Shu bilan birga qovushqoq-elastiklik xususiyatga ega bo'lgan materiallardan tayyorlangan silindrik qobiq tipidagi quvurlar tebranish jarayonlari yetarli tahlil qilinmagan, geometrik noxizizli va pulsatsiyali tezlikka ega bo'lgan suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvur tebranish jarayonining matematik modeli ishlab chiqilmagan. Silindrik quvurlarga ta'sir qiluvchi pulsatsiyali oqim, bir va ikki parametrlil asosga ega bo'lgan quvurlarning tebranish jarayonlari, suyuqlik oqimi kritik tezligini aniqlash metodikasi, modellashtirish masalalarining hisoblash usullari yetarli darajada ishlab chiqilmagan va rivojlantirilmagan. Shu sababli, sohalardagi jarayonlar va hodisalarni adekvat ravishda tavsiflovchi matematik modellarni va hisoblash algoritmlarini ishlab chiqish talab qilinadi.

---

<sup>1</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 18-dekabrda PQ-4929-sonli "Hududlarda muhandislik-kommunikatsiya infratuzilmasini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi qarori

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqotlari Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari institutining QXA-13-001 "Ichidan suyuqlik oqib o'tuvchi yopishqoq-elastik quvurlar tebranish jarayonini matematik modellashtirish" (2015-2017) mavzusidagi loyiha va №-2018-224 "Differensial tenglamalar yechimlari va ularning injenerlik masalalariga tadbiqu" (2017-2020) institut ilmiy-tadqiqot ishlari mavzusi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlarning tebranish jarayonlarini tahlil qilish uchun matematik modellar, metodlar, hisoblash algoritmlari va kompyuter dasturlarini yaratishdan iboratdir.

**Tadqiqotning vazifalari:**

ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlarning asos bilan o'zaro ta'sirini Vinkler, Pasternak modellar orqali chiziqli va nochiziqli tebranishlari jarayonining matematik modellarini ishlab chiqish;

ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlar tebranishi masalalarining diskret modellarini ishlab chiqish;

silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlar tebranishi masalalari yechimlarining zaruriy aniqligi va qovushqoq-elastik nazariyasi bo'yicha maxsusligi inobatga olingan modellarda hisoblash jarayonining turg'unligini ta'minlaydigan hisoblash algoritmlarini ishlab chiqish;

silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlar tebranishi jarayonlarini modelashtirish masalalari sinfining algoritmlari asosida dasturiy majmuasini ishlab chiqish;

ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlar tebranish masalalarining yechish va olingan natijalarni tahlil qilish.

**Tadqiqotning obykti** sifatida ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlarning tebranish jarayonlari olingan.

**Tadqiqotning predmetini** ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlar tebranish jarayonlarining matematik modeli, hisoblash usullari, algoritmlari va kompyuter dasturlari tashkil etadi.

**Tadqiqotning usullari.** Qovushqoq-elastiklik nazariyasi metodlari; silindrik qobiq nazariyasining matematik metodlari; integral va integrodifferensial tenglamalarni sonli usulda yechish metodlari; amaliy kompleks kompyuter dasturlari yaratish va hisoblash eksperimentlari o'tkazish metodlaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

suyuqlik oqib o'tuvchi silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlar Vinkler, Pasternak modellar asosida olingan chiziqli tebranishlari jarayonining matematik modeli takomillashtirilgan;

silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlar tebranish jarayonlari singulyar yadroli integro-differensial tenglamalarida maxsuslikni ratsional almashtirish orqali yo'qotiladigan va kvadratur formulalarga asoslangan hisoblash algoritmi taklif etilgan;

silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik suyuqlik o'tkazuvchi quvurlar gruntli asosni Vinkler, Pasternak modellar asosida olingan nochiziqli tebranishlari jarayoni uchun matematik modeli ishlab chiqilgan;

ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik quvur materialining qovushqoq-elastiklik xususiyatlarini inobatga olgan holda asosning Vinkler va Pasternak modellari asosida tebranish jarayonini tadqiq qilish uchun dasturiy majmuasi ishlab chiqilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Tadqiqot natijalarining ishonchliligi qovushqoq-elastiklik nazariyasi, silindrik qobiq nazariyasi, integro-differensial tenglamalarni sonli yechish usullarini qo'llash hamda silindrik quvurlarning tebranishi jarayonlari natijalari xorijiy ilmiy jurnallardagi mualliflarning natijalari bilan taqqoslanganligi, sonli yechimlarning xususiy holda analitik yechimlar bilan o'zaro solishtirilganligi bilan asoslangan.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati deformatsiyalanuvchan qovushqoq-elastiklik nazariyasining integral modellari asosida ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik quvurlar tebranishlarining harakat tenglamalari va hisoblash algoritmlarini ishlab chiqishdan iborat. Ishlab chiqilgan matematik modellar, hisoblash algoritmlari va kompyuter dasturlari neft-gaz quvurlari va gidrotexnika inshootlarida suv chiqarish quvurlarini loyihalashtirish hamda matematik modellashtirish nazariyasiga muhim hissa qo'shishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati silindrik qobiq tipidagi quvur materiali va gruntli asosning qovushqoq-elastiklik xususiyatlari hisobga olgan holda ishlab chiqilgan matematik modellar, hisoblash algoritmlari va kompyuter dasturlari, olingan yangi natijalar suv xo'jaligi, kimyo sanoati va neft-gaz tarmoqlari masalalarini yechishda hamda ta'lim jarayoniga qo'llanishi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan qovushqoq-elastik silindrik quvurlarning tebranish jarayonini matematik modellashtirish bo'yicha olingan natijalar asosida:

suyuqlik oqib o'tuvchi silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlar Vinkler, Pasternak modellar asosida tebranish jarayoniga ta'siri, suv omborlari suv chiqarish quvurlariga gruntli asosning ta'sirini baholash uchun Oqsuv irrigatsiya tizim boshqarmasiga qarashli "Tirkashev Yusuf" fermer xo'jaligi nasos stansiyalaridagi quvurlarning chidamliligi va mustahkamligida joriy etilgan (Suv xo'jaligi vazirligining 2022-yil 10-fevraldagi NK16184435-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, quvurlarning mustahkamligini aniqlash maqsadida muhandislik hisoblarini o'tkazishga ketadigan vaqtni 1,5 marta kamaytirish imkonini bergan;

silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvurlarning tebranish jarayonlarining matematik modellari, singulyar yadroli integro-differensial tenglamalarida maxsuslikni ratsional almashtirish orqali yo'qotiladigan va kvadratur formulalarga asoslangan hisoblash algoritmi va yaratilgan kompyuter dasturlari "TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti o'quv jarayoniga joriy qilingan (Suv xo'jaligi vazirligining 2022-yil 10-fevraldagi NK16184435-sonli

ma'lumotnomasi). Natija, talabalarda suyuqlik o'tkazuvchi qovushqoq-elastik quvur masalalari yechimlarini sonli qiymatlarda va grafik holda olish imkonini bergan.

silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik suyuqlik o'tkazuvchi quvurlar gruntli asosni Vinkler, Pasternak modellar asosida hisobga olgan pulsatsiyali suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik quvurlarning nochiziqli tebranishlari jarayoni uchun matematik modeli, hisoblash usuli va algoritmik dasturi Chimqo'rg'on suv omboridagi suv chiqarish quvurlariga joriy qilingan (Suv xo'jaligi vazirligining 2022-yil 10-fevraldagi NK16184435-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, Chimqo'rg'on suv omboridagi suv chiqarish quvurlarida yuzaga keladigan pulsatsiyali oqimning ta'sirini baholash imkoniyati yaratilgan;

ichidan pulsatsiyali suyuqlik oqib o'tayotgan silindrik quvurlarning qovushqoq-elastiklik xususiyatlarini inobatga olgan holda Vinkler va Pasternak modellari asosida tebranish jarayonini tadqiq qilish uchun dasturiy majmua , matematik model, hisoblash usuli Amu-Qashqadaryo Irrigatsiya tizimlari havza boshqarmasiga qarashli nasos stansiyalaridagi suv chiqarish quvurlarini mustahkamlikka hisoblashda joriy qilingan (Suv xo'jaligi vazirligining 2022-yil 10-fevraldagi NK16184435-sonli ma'lumotnomasi). Natijada, nasos stansiyalaridagi suv chiqarish quvurlarida yuzaga keladigan o'zgaruvchan oqim tezligi, quvurda bosim o'zgarishi va quvurlarning yaroqliligini aniqlash imkonini bergan;

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Mazkur tadqiqot natijalari 4 ta xalqaro va 4 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 19 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, 1 ta monografiya, O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiyasi komissiyasining falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 7 ta maqola, jumladan, 2 tasi respublika, 5 tasi xorijiy ilmiy jurnallarda nashr etilgan. Respublika konferensiyalarida 4 ta, xorijiy konferensiyalarda 4 ta maqola chop etilgan hamda 2 ta EHM uchun yaratilgan dasturlarni qayd qilish guvohnomalari olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya tarkibi kirish, 3 ta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 92 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zururati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, ob'yekti va predmeti tavsiflangan, muammoning o'rganilganlik darajasi hamda tadqiqotning ilmiy ishlar rejasi bilan bog'liqligi ochib berilgan, tadqiqotning o'tkazish uslublari, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilinishi, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning “**Qovushqoq-elastik silindrik quvurlarning chiziqli dinamikasini baholashning matematik modeli va hisoblash usuli**” deb nomlangan birinchi bobda muammoning hozirgi holati, qovushqoq-elastiklik nazariyasining kuchlanishlar va deformatsiyalar orasidagi bog‘lanishini ifodalovchi differensial va integral modellar keltirilgan bo‘lib, ma’lum tamoyillar asosida ularning ustun jihatlari va kamchiliklari tahlil qilingan. Shunigdek ichidan suyuqlik harakat qiluvchi ortotrop silindrik konstruksiya dinamikasini baholash uchun Boltsman-Volterraning qovushqoq-elastiklik nazariyasiga va Kirxgof-Lyav gipotezasiga asoslangan matematik model ishlab chiqildi. Hosil bo‘lgan integro-differensial tenglamalar sistemasini boshlang‘ich shartlarni qanoatlantirib yechish uchun kvadratura formulaga asoslangan hisoblash usuli, algoritm va kompyuter dasturi yaratildi. Ichidan suyuqlik harakatlanuvchi yupqa devorli silindrik konstruksiyaning dinamik holatlari qovushqoq-elastiklikni turli parametrlarida tahlil qilinib, olingan natijalar bo‘yicha silindrning xavfli tebranish amplitudasini kamaytirish mumkinligi ko‘rsatilgan.

Qovushqoq-elastik tizimlarning tebranishi va ustuvorligi bo‘yicha dinamik masalalarni matematik modellarini silindrik qobiqlarning geometriyasini e‘tiborga olgan holda tuzish hozirgi kunda juda dolzarbdir, chunki amaliyotning turli sohalarida qovushqoq-elastik xususiyatlarga ega materiallardan foydalanish imkoniyati kengayib bormoqda.

Xotirali qovushqoq-elastiklik nazariyasi masalasini modellashtirishning taklif etilayotgan usuli asosida model tanlashning asosiy tamoyillari quyidagilardir:

- real sharoitlarda kuchlanish va deformatsiyani bog‘lovchi integral modellarning adekvatligi;
- turli nazariyalar asosida yaratilgan matematik modellarning adekvatligi;
- singulyar yadroli nochiziqli integro-differensial tenglamalarning yuqori aniqlikda yechilishini ta‘minlovchi analitik va sonli usullarning samaradorligi;
- nochiziqli dinamik masalalar sinfini tadqiq etish imkonini beruvchi amaliy dasturlar paketining samaradorligi.

Hozirgi kunda ko‘p sonli yetakchi olimlar tomonidan tan olinganki, qovushqoq-elastik jismlarda kuchlanishlar va deformatsiyalar orasidagi bog‘lanishning integral modeli Boltsman-Volterraning kuchsiz singulyar yadroli xotirali qovushqoq-elastiklik nazariyasini adekvat tavsiflaydi (1-jadval).

Xotirali qovushqoq-elastiklik masalasi uchun Boltsman-Volterra integral modelining tanlanishi quyidagi mulohazalarga asoslangan:

- fizik jarayonlarni adekvat tavsiflaydi;
- modelning universalligi – bu modelni xotirali qovushqoq-elastiklik nazariyasi nochiziqli dinamik masalalarining juda keng sinfiga qo‘llash mumkin.

1-jadval

### **Xotirali qovushqoq-elastiklik nazariyasining modellari**

№	Modellarning turlari	Modellarning nomlari
1.	$P(\sigma) = Q(\varepsilon)$ $P, Q$ –chiziqli differensial operatorlar:	Differensial model

	$\begin{Bmatrix} P \\ Q \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_n \\ b_n \end{Bmatrix} \frac{d^n}{dt^n} + \begin{Bmatrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{Bmatrix} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + \begin{Bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{Bmatrix}$	
2.	$a_0\sigma + a_1\dot{\sigma} = b_0\varepsilon + b_1\dot{\varepsilon}$	Standart qovushqoq elastik jism modeli
3.	$\sigma(t) = E \left[ \varepsilon(t) - \int_0^t R(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau \right]$	Boltsman-Volterra modeli

Kuchlanishlar  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$  va deformatsiyalar  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$  o'rtasidagi o'zgarish qonunini ifodalaydigan Boltsman-Volterra integral modelini integral ko'rinishda ifodalaymiz:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\mu^2}(1-R^*)(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), & \sigma_y &= \frac{E}{1-\mu^2}(1-R^*)(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) \\ \sigma_{xy} &= \frac{E}{2(1+\mu)}(1-R^*)\varepsilon_{xy}, & R^*\varepsilon &= \int_0^t R(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

bu yerda  $E$  - elastiklik moduli;  $\mu$  - Puasson koeffitsienti;  $R^*$  - relaksatsiya yadrosi  $R(t)$  bo'lgan integral operator;  $t$  - kuzatish vaqti;  $\tau$  - kuzatish momentidan oldingi vaqt;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$  - chekli deformatsiyaning komponentalari.

Sonli yechimlarning aniqligi relaksatsiya yadrosining to'g'ri tanlanishiga bog'liq bo'ladi. Ko'plab muhandislik masalalarini yechishga doir tadqiqotlarda eksponensial yadro yoki eksponentialarning yig'indilari ko'rinishidagi yadrodan foydalanilgan (2-jadval). Relaksatsiya yadrosining eksponensial yoki eksponentialarning yig'indisi ko'rinishida tanlanishi integral modelni kuchlanishlar va deformatsiyalar o'rtasidagi bog'lanishning dastlabki modeliga, ya'ni differensial modelga, keltirish imkonini beradi (1-jadval). Vaqtning boshlang'ich momentida ( $t=0$ ) bu relaksatsiya yadrolari chekli qiymatga ega bo'ladi, chunki bunda relaksatsiya jarayonlarining boshlanishida kuzatiladigan xususiyatlar o'z aksini topmaydi, ko'pgina tadqiqotlar  $R(0) \rightarrow \infty$  ekanligini ko'rsatmoqda. Shuning uchun qovushqoq-elastiklik xossalariga ega bo'lgan materiallarda kuchlanishlar va deformatsiyalar orasidagi bog'lanishni aks ettiruvchi va adekvatlikni ta'minlovchi integral modellarni shakllantirish uchun maxsuslikka ega bo'lgan kuchsiz singulyar yadroni tanlash masalasi qaralayotgan masalalarning matematik modellarini qurishning muhim jihatlaridan biri hisoblanadi.

2-jadval

### Xotirali qovushqoq-elastiklik nazariyasining relaksatsiya yadrolari

№	Yadroning ko'rinishlari	Yadroning nomlari
1.	$R(t) = A \exp(-\beta \cdot t), \quad A > 0, \quad \beta > 0$	Eksponensial yadro
2.	$R(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-\beta_i \cdot t), \quad A_i > 0, \quad \beta_i > 0$	Eksponentialarning yig'indilari ko'rinishidagi yadro

<b>3.</b>	$R(t) = A \cdot \exp(-\beta \cdot t) \cdot t^{\alpha-1},$ $A > 0, \beta > 0, 0 < \alpha < 1$	Koltunov-Rjanitsin yadrosi
-----------	---	----------------------------

Abel tipidagi eng keng tarqalgan maxsuslikka ega bo'lgan kuchsiz singulyar yadro bu Koltunov-Rjanitsin yadrosidir

$$R(t) = A \cdot \exp(-\beta \cdot t) \cdot t^{\alpha-1}, \quad A > 0, \beta > 0, 0 < \alpha < 1 \quad (2)$$

bu yerda  $A$  - qovushqoqlik parametri,  $\alpha$  - singulyarlik parametri,  $\beta$  - so'nish parametri.

Yadrolar approksimatsiyalarining aniqligi ularni eksperiment natijalari bilan taqqoslab tekshiriladi. Koltunov-Rjanitsinning mavjud uchta parametrli xotirali singulyar yadrosi relaksatsiya yadrolariga qo'yilgan hamma shartlarni qanoatlantiradi va eksperimentda olingan natijalarni katta vaqt oralig'ida eng yaxshi tarzda approksimatsiyalaydi. Shuning uchun xotirali deformatsiyalanuvchi sistemalarning dinamik masalalarini yechishda Koltunov-Rjanitsinning kuchsiz singulyar yadrosidan foydalanilgan holda kuchlanish va deformatsiya orasidagi bog'lanishni ifodalovchi Bolsman-Volterra integral modeli qo'llaniladi.

Dissertatsiyaning **“Ichidan suyuqlik oqib o'tuvchi qovushqoq-elastik silindrik qobiqlarning nohiziqli tebranishlari”** deb nomlangan ikkinchi bobida geometrik nohiziqlikni hisobga olgan holda ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan qovushqoq-elastik silindrik quvurlar dinamikasi masalasining matematik modeli qurilgan. Masalani yechish uchun kvadratura formulaga asoslangan sonli usul taklif etilgan, hamda sonli yechish algoritmi ishlab chiqilgan. Olingan natijalarning to'g'riligini tekshirish uchun test masalalari yechilgan. Quvurning geometrik va fizik parametrlarining turli qiymatlarida, silindrik qobiqning nohiziqlik dinamikasiga har xil tashqi va ichki ta'sirlar tekshirilib, suyuqlik oqimining kritik tezligini aniqlovchi mezon ko'rsatilib, suyuqlikning kritik tezliklari aniqlangan.

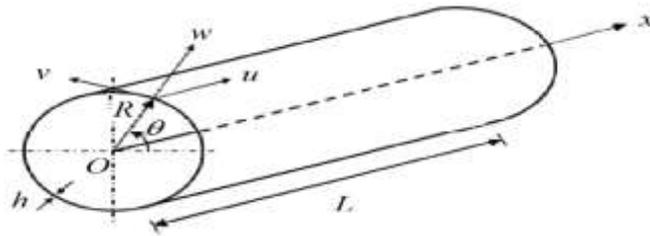
Ichidan o'zgarmas tezlik bilan suyuqlik harakatlanayotgan yupqa devorli qovushqoq-elastik silindrik qobiqni (2.1-rasm) ko'rinishidagi quvurning harakat tenglamasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\begin{cases} \frac{Eh}{1-\mu^2} (1-R^*) \{L_{11}u + L_{12}v + L_{13}w\} = \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{Eh}{1-\mu^2} (1-R^*) \{L_{21}u + L_{22}v + L_{23}w\} = \rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ \frac{Eh}{1-\mu^2} (1-R^*) \{L_{31}u + L_{32}v + L_{33}w\} = q - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \end{cases} \quad (3)$$

bu yerda  $\rho$  - quvur materiali zichligi,  $h$  - quvur qalinligi,  $q$  - suyuqlikning qobiq devoriga bosimi

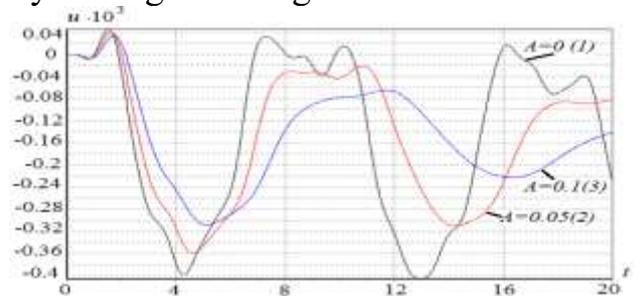
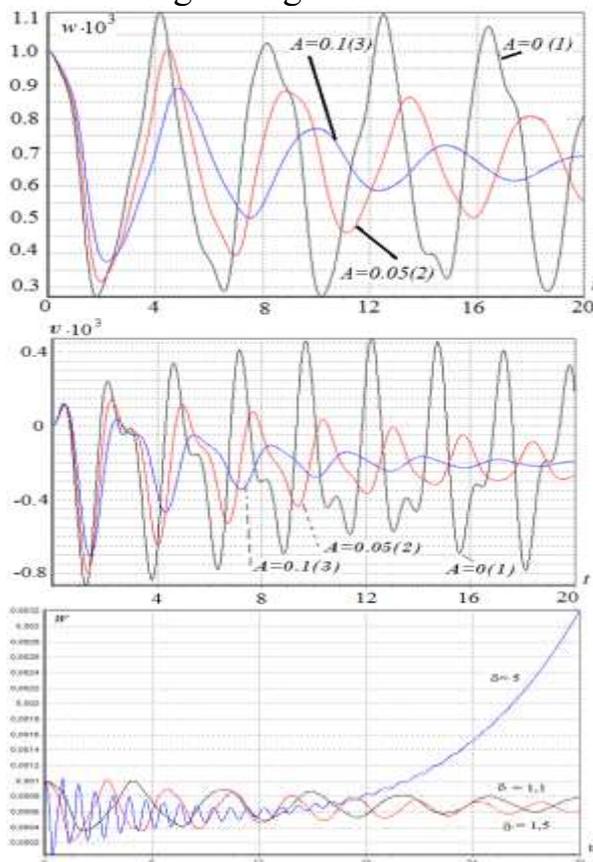
$$\begin{aligned} L_{11} &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}, & L_{22} &= \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}, & L_{12} &= L_{21} = \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2}{\partial x \partial \theta}, \\ L_{33} &= \frac{1}{R^2} + \frac{h^2}{12} \left( \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{1}{R^2} \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{R^4} \frac{\partial^4}{\partial \theta^4} \right), & L_{13} &= L_{31} = -\frac{\mu}{R} \frac{\partial}{\partial x}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$L_{23} = L_{32} = -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta},$$



**2.1-rasm.** Silindrik qobiq sxemasi

2.2-rasmda (a, b, c) silindrik qobiqning uzunligi bo'yicha o'rtasiga joylashgan nuqtasining qovushqoq-elastiklikni  $A$  parametriga bog'liq holda ko'chish komponentalari  $w, u, v$  larning amplitudasini vaqt bo'yicha o'zgarishlari keltirilgan. Grafiklardan ko'rinadiki, quvur materiali qovushqoq-elastik xossalarning hisobga olinishi tebranish jarayonining so'nishiga olib keladi.



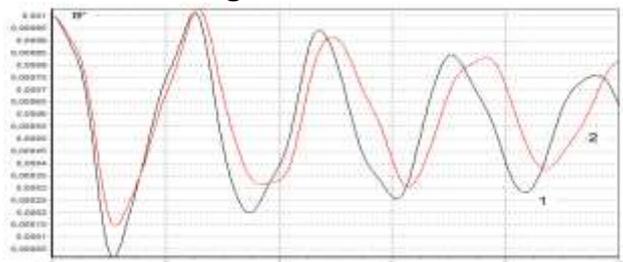
**2.2-rasm.**  $A$  reologik parametrning turli qiymatlarida ( $w, u, v$ ) vaqt bo'yicha qovushqoq-elastik silindrik qobiqning markaziy nuqtasida ko'chish komponentalarining o'zgarishi:  $A = 0$  (1),  $A = 0.05$  (2),  $A = 0.1$  (3)

**2.3-rasm.**  $\delta$  geometrik parametrning turli qiymatlarida vaqt bo'yicha qovushqoq-elastik silindrik qobiqning markaziy nuqtasida  $w$  ko'chish komponentasining o'zgarishi:  $\delta = 1,1$  (1),  $\delta = 1,5$  (2),  $\delta = 5$  (3)

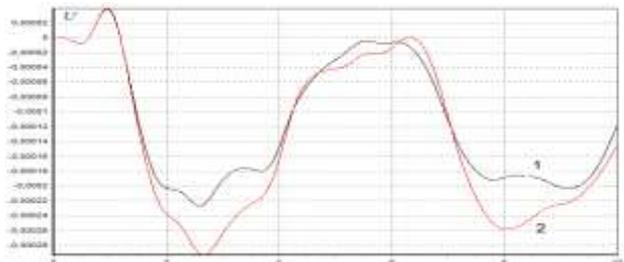
2.3-rasmda qovushqoq-elastik quvur  $w$  egilishining  $\delta = R/h$  parametrning turli qiymatlarida vaqtga bog'lanishi tasvirlangan. Ko'rsatib o'tilgan egri chiziqlarning tahlilidan quvur qalinligining kamayishi tebranishlar chastotasining ortishiga olib keladi, degan xulosa chiqadi. Quvur egilish amplitudasining  $\delta = 50$  (3-egri chiziq) bo'lgan holda sezilarli kattalashgani kuzatiladi.

Silindrik qobiq tipidagi qovushqoq-elastik quvur nuqtasining  $w$  (2.4-rasm),  $u$  (2.5-rasm),  $v$  (2.6-rasm) ko'chishlari vaqt bo'yicha o'zgarishining chiziqli nazariya (1-egri chiziq) va nochiziqli nazariya (2-egri chiziq) bo'yicha olingan egri chiziqlari tasvirlangan (2.4-2.6-rasmlar). Chiziqli va nochiziqli nazariyalarda olingan natijalar bir-biridan sezilarli farq qiladi (2.4-rasm). Bunda, chiziqli va

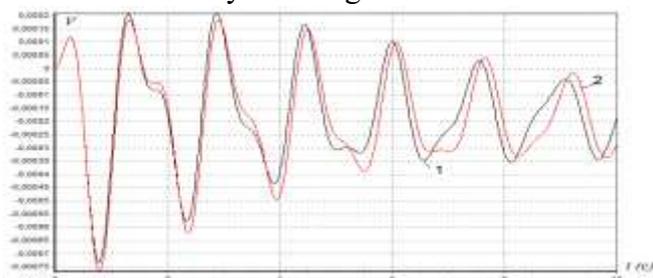
nohiziqli masalalarning vaqtning boshlang'ich momentida bir-biridan kam farq qiladi hamda vaqt o'tishi bilan geometrik nohiziqlik xossalari yechimga sezilarli ta'siri ko'rsatilgan.



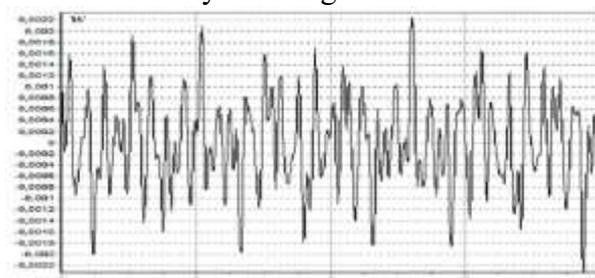
**2.4-rasm.** Qovushqoq-elastik silindrik qobiq markaziy nuqtasining  $w$  ko'chish komponentasining geometrik chiziqli (1) va geometrik nohiziqli (2) masalalarda vaqt bo'yicha o'zgarishi



**2.5-rasm.** Qovushqoq-elastik silindrik qobiq markaziy nuqtasining  $u$  ko'chish komponentasining geometrik chiziqli (1) va geometrik nohiziqli (2) masalalarda vaqt bo'yicha o'zgarishi



**2.6-rasm.** Qovushqoq-elastik silindrik qobiq markaziy nuqtasining  $v$  ko'chish komponentasining geometrik chiziqli (1) va geometrik nohiziqli (2) masalalarda vaqt bo'yicha o'zgarishi



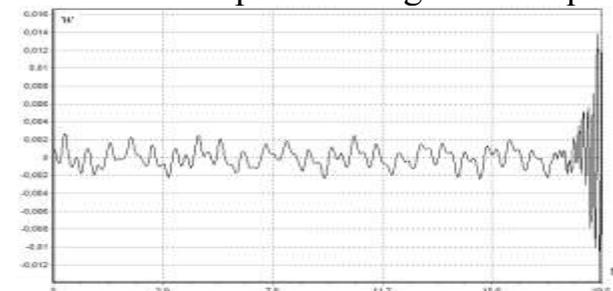
**2.7-rasm.** Qovushqoq-elastik silindrik qobiq markaziy nuqtasining  $w$  ko'chish komponentasining  $v^* = v_{cr}^*$  holatda vaqt bo'yicha o'zgarishi

Gaz oqimining kritik tezligini aniqlash mezoni sifatida, tezliklar to'plamining yuqori aniq chegarasi  $\{V\}$  tanlanadi, bunda  $t \geq 0$  shartda Bubnov-Galerkin qatorining yaqinlashuvi ta'minlanadi, ya'ni, quyidagi shart bajariladi

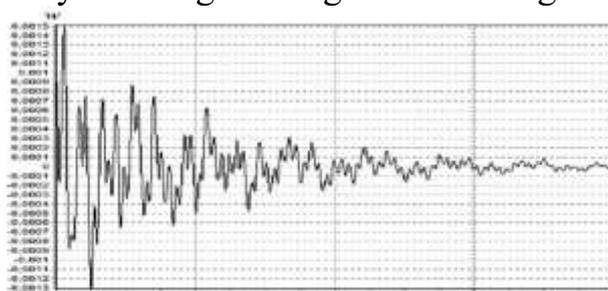
$$w(x, y, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_{nm}(t) \phi_{nm}(x, y) > 1 \quad (5)$$

bu yerda  $w_{nm}(t)$  - vaqtga bog'liq funksiyalardir;  $\phi_{nm}(x, y)$  - chegaraviy shartlarga bog'liq bo'lgan ma'lum koordinata funksiyasidir.

2.7-rasmda suyuqlik oqimining kritik tezligini aniqlovchi mezoni sifatida tebranishlar amplitudasini garmonik qonun bo'yicha o'zgartiradigan tezlik olingan



**2.8-rasm.** Qovushqoq-elastik silindrik qobiq markaziy nuqtasining  $w$  ko'chish komponentasining  $v^* > v_{cr}^*$  holatda vaqt bo'yicha o'zgarishi



**2.9-rasm.** Qovushqoq-elastik silindrik qobiq markaziy nuqtasining  $w$  ko'chish komponentasining  $v^* < v_{cr}^*$  holatda vaqt bo'yicha o'zgarishi

2.8-rasmda tezlik  $v^* > v_{cr}^*$  bo'lganda intensiv o'suvchi amplitudali tebranishli harakat yuz beradi, bu harakat konstruksiyaning buzilishiga olib kelish ko'rsatilgan.

2.9-rasmda  $v^* < v_{cr}^*$  shart bajarilganda  $v_{cr}^*$  tezlikni kritik tezlik deb ataladi, bunday tezlikda quvur to'g'ri chiziqli ko'rinishdagi muvozanat ustuvorligini yo'qotadi. Oqim tezligi kritik tezlikdan kichik  $v^* < v_{cr}^*$  bo'lganda esa tebranishlar amplitudasi so'nishi tasvirlangan.

Reologik parametrlarning suyuqlik kritik tezligiga ta'siri 3-jadvalda ko'rsatilgan. Ko'rsatilgan natijalar tahlilidan ko'rinib turibdiki, suyuqlik tezligining kritik qiymati elastik ( $A = 0$ ) va qovushqoq-elastik holatda ( $A = 0.1$ ) mos ravishda 25.08 va 14.19 ga teng. Shunday qilib, konstruksiya materialining qovushqoq-elastik xususiyatlari suyuqlik kritik tezligining pasayishiga olib keladi.

Shuningdek, 3-jadvalda, Bubnov-Galerkin usulining sonli yaqinlashishi tekshiriladi.  $M = 5$  da kritik tezlik 23.47;  $M = 6$  da bu tezlik 24.34 ga teng. Ularning orasidagi farq 3.7% ni tashkil qiladi. Qobiqning egilish shaklini ifodalovchi  $M$  ning qiymatining oshishi suyuqlikning kritik tezligiga sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi.

3-jadval

**Reologik parametrlarning suyuqlikning kritik tezligiga ta'siri**

$A$	$\alpha$	$\beta$	$M$	$U_{cr} (m/s)$
0				25.08
0.01	0.25	0.005	5	23.43
0.1				14.19
	0.15			24.42
0.01	0.4	0.005	5	24.40
	0.5			24.40
	0.7			24.39
0.01	0.25	0.001	5	24.16
		0.007		23.40
0.01	0.25	0.004	3	14.67
			4	21.92
			5	23.47
			6	24.34
			7	24.41

Dissertatsiyaning “Ichidan suyuqlik oqib o'tuvchi murakkab qovushqoq-elastik sistema (silindrik quvur va asos)ning nochiziqli tebranish jarayonlarining matematik modeli, hisoblash usuli, algoritmi va olingan natijalarning tahlili” deb nomlangan uchinchi bobida ichidan pulsatsiyalik suyuqlik oqib o'tuvchi silindrik quvurning nochiziqli dinamikasini ifodalovchi integro-differensial tenglamalarga asoslangan matematik model ishlab chiqilib, hosil qilingan nochiziqli integro-differensial tenglamalarni kvadratura formulalari yordamida sonli yechish algoritmi va kompyuter dasturi ishlab chiqilgan. Ishlab chiqilgan matematik modellar, algoritmlar va kompyuter dasturlari yordamida pulsatsiyalanuvchi oqim ta'sirida qovushqoq-elastik murakkab tizimning nochiziqli tebranishlari o'rganilgan. Olingan natijalar asosida yangi mexanik effektlar aniqlangan.

Pulsatsiyalanuvchi yuklar ta'siri ostida silindrik quvurlarning matematik modellarini, yechish usullarini ishlab chiqish va dinamikasini baholash hozirgi paytda juda dolzarb va zarur muammo bo'lib, uni yechilishi talab qilinadi.

Qalinligi  $h$ , uzunligi  $L$  bo'lgan silindrik qobiq ko'rinishidagi qovushqoq-elastik suyuqlik-gaz quvurini qaraymiz. Quvurning ichida  $U(t)$  tezlikda pulsatsiyali suyuqlik oqayotgan bo'lsin, ya'ni:

$$U(t) = U_0(1 + \lambda \cos \varphi t). \quad (6)$$

Bu yerda  $\lambda$  - qo'zg'atuvchi parametr (pulsirlanuvchi suyuqlikning amplitudasi);  $\varphi$  - pulsatsiya chastotasi.

Silindrik quvurdagi dinamik jarayonni o'zida aks ettiruvchi xususiy hosilali integro-differensial tenglamalar sistemasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\begin{aligned} (1 - \Gamma^*) \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1 - \mu}{2R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1 + \mu}{2R} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + L_1(w) \right] &= \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ (1 - \Gamma^*) \left[ \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1 - \mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1 + \mu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + L_2(w) \right] &= \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ D(1 - \Gamma^*) \nabla^4 w + L_3(u, v, w) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \\ = -\Phi^* \rho \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + U_0^2 (1 + \lambda \cos \varphi t)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] & \quad (7) \end{aligned}$$

Bu tenglamalar uchun chegaraviy va boshlang'ich shartlar quyidagicha bo'ladi:

$$x = 0 \text{ va } x = L \text{ da } w = 0, v = 0, M_x = 0, N_x = 0 \quad (8)$$

$$u(x, y, 0) = \phi_1(x, y), \quad \dot{u}(x, y, 0) = \psi_1(x, y),$$

$$v(x, y, 0) = \phi_2(x, y), \quad \dot{v}(x, y, 0) = \psi_2(x, y), \quad (9)$$

$$w(x, y, 0) = \phi_3(x, y), \quad \dot{w}(x, y, 0) = \psi_3(x, y)$$

Bu nohiziqli xususiy hosilali integro-differensial tenglamalar sistemasi (7) chegaraviy (8) va boshlang'ich (9) shartlar bilan birgalikda o'zida pulsatsiyali suyuqlik oqib o'tuvchi va katta diametrli qovushqoq-elastik quvurlarning parametrlil tebranishlarining matematik modelni ifodalaydi.

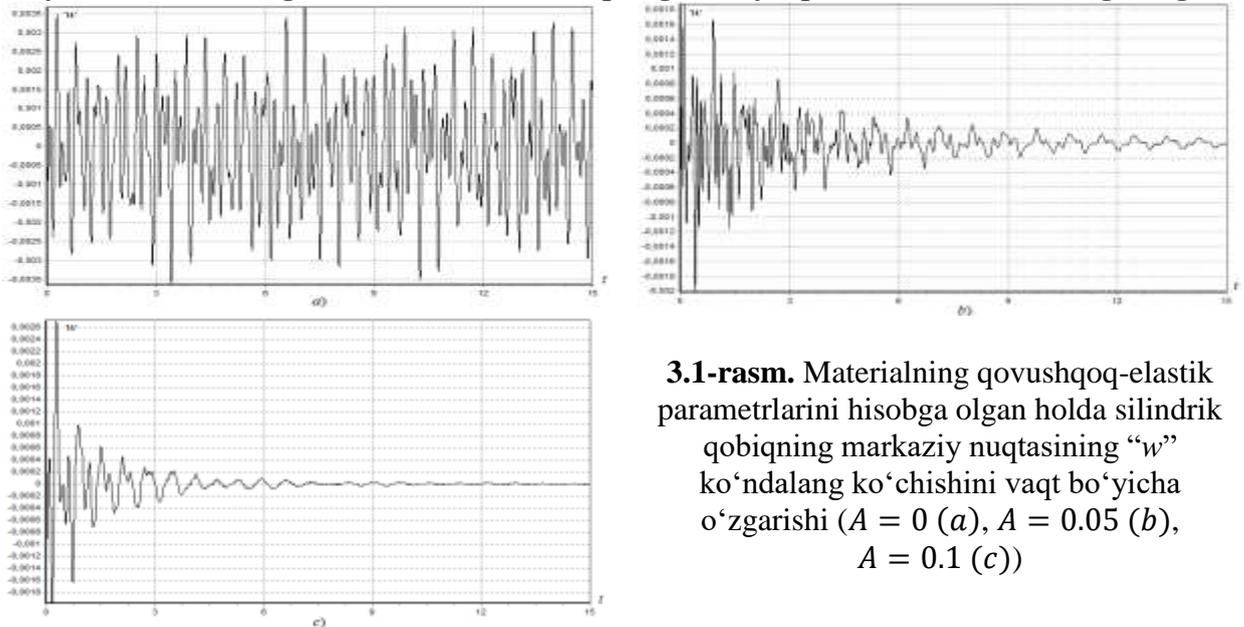
Nohiziqli integro-differensial tenglamalar sistemasi (7) ni kuchsiz singulyar yadrolari ishtirokida yechish matematik jihatdan murakkab masala hisoblanadi. Shuning uchun bu sistemani yechishning usuli fazoviy o'zgaruvchilar bo'yicha diskretlashtirish va vaqt funksiyalariga nisbatan yechimi nohiziqli integro-differensial tenglamalar sistemasini hosil qiladi. Quyidagi keltirilgan ifodalarni (7) tenglamalar sistemasiga qo'yib hamda Bubnov-Galerkin usulini qo'llab, faqat vaqtga bog'liq bo'lgan nohiziqli oddiy integro-differensial tenglamalar sistemasini hosil qilingan, boshlang'ich shartlarni e'tiborga olgan holda bu sistemani kvadratura formulalar yordamida sonli yechish usuli taklif qilingan va algoritmi yaratilgan.

$$u(x, y, \theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_{nm}(t) \cos \frac{n\pi x}{L} \sin(m\theta),$$

$$v(x, y, \theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M v_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{L} \cos(m\theta),$$

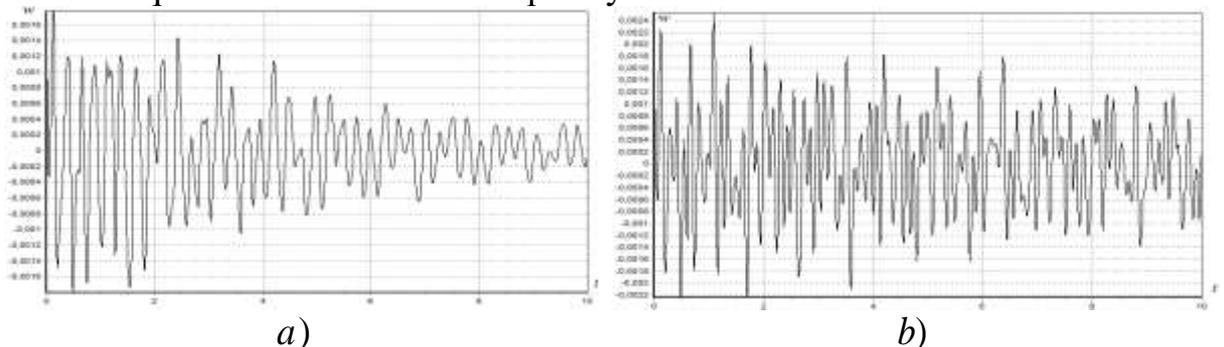
$$w(x, y, \theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{L} \sin(m\theta)$$

Yuqorida ishlab chiqilgan hisoblash usuli, algoritm va kompyuter dasturlaridan foydalangan holda qovushqoq-elastik silindrik quvurlardagi dinamik jarayonlar unda o'zgaruvchan tezlikda oqadigan suyuqlik ta'siri ostida o'rganilgan.



**3.1-rasm.** Materialning qovushqoq-elastik parametrlarini hisobga olgan holda silindrik qobiqning markaziy nuqtasining “w” ko‘ndalang ko‘chishini vaqt bo‘yicha o‘zgarishi ( $A = 0$  (a),  $A = 0.05$  (b),  $A = 0.1$  (c))

3.1-rasmda silindrik qobiqlarning ko‘ndalang ko‘chishi “w” materiali elastik ( $A = 0$  da: a rasm) va qovushqoq-elastik ( $A = 0.05, 0.1$  da: b, c - rasmlar) bo‘lganda vaqt bo‘yicha o‘zgarish grafiklari keltirilgan. Grafiklardan ko‘rinadiki, quvur materiali elastik bo‘lganida tebranishda so‘nish ro‘y bermaydi. Material qovushqoq-elastik bo‘lganida (3.1 - b, c - rasm) tebranish jarayonida turli darajada so‘nish hodisasi ro‘y beradi. A ( $A = 0.05, 0.1$ ) reologik parametri qanchalik katta bo‘lsa vaqt bo‘yicha tebranish shuncha tez so‘nadi.



**3.2-rasm.** Qovushqoq-elastik silindrik qobiqning markaziy nuqtasining ko‘ndalang ko‘chishi “w” pulsatsiyalik oqimi turli chastotalarida ( $\varphi = 75$  Hz (a),  $150$  Hz (b)) vaqt bo‘yicha o‘zgarish grafiklari

3.2-rasmda oqimning pulsatsiya chastotasi  $\varphi$  ning silindrik qobiqning tebranish jarayoniga ta'siri keltirilgan. Grafikdan (3.2 - a, b - rasmlar), ko‘rinadiki pulsatsiyaning past chastotalarida quvurning qovushqoq-elastiklik xususiyati

tebranish amplitudasini vaqt bo'yicha sekin asta so'nishiga olib keladi. Lekin pulsatsiya chastotasining ba'zi qiymatlarida vaqt o'tishi bilan tebranish amplitudasining tez o'sishi kuzatiladi. Buni pulsatsiyalanuvchi oqim chastotasining quvurning xususiy tebranish chastotasiga yaqinlashishi bilan izohlash mumkin, bu esa rezonansga olib kelishi mumkin.

Keyingi tadqiqotlarda qovushqoq-elastik grunt asosidagi silindrik quvurlarning noxiziqli tebranishlari o'rganilgan. Hozirgi kunda gruntli asosning mexanik modelini takomillashtirishga qaratilgan ko'plab nazariyalar ishlab chiqilgan. Masalan, sodda Vinkler modeli asosida ikki parametrlil Pasternak modeli taklif qilingan bo'lib, u gruntning qovushqoq-elastik xususiyatlarini hisobga oladi. Bu model bir tomondan Vinkler modelidan farqli o'laroq matematik masalaning qo'yilishini jiddiy murakkablashtirmasligi, ikkinchi tomondan esa gruntning dispersiyon xususiyatlarini va ichki qismi bo'ylab doimiy tezlikda ideal suyuqlik harakatlanayotgan yupqa devorli qovushqoq-elastik silindrik qobiqning asos bilan o'zaro ta'sirini hisobga olishi bilan ahamiyatlidir.

Suyuqlik  $U$  tezlikka ega bo'lib, uning yo'nalishi qovushqoq-elastik silindrik qobiqning  $OX$  o'qi yo'nalishi bilan ustma-ust tushadi tashqi muhitning ta'siri esa Pasternak modeli bo'yicha ifodalanadi. Qovushqoq-elastik silindrik qobiqda sodir bo'ladigan jarayonni matematik modelini qurishda quvur egilishi uning qalinligiga nisbatan kichik deb hisoblanadi va Kirxgof-Lyav gipotezasidan foydalaniladi.

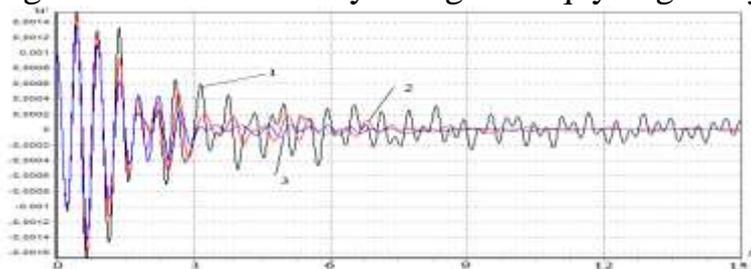
$$(1 - \Gamma^*) \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1 - \mu}{2R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1 + \mu}{2R} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + L_1(w) \right] - \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

$$(1 - \Gamma^*) \left[ \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1 - \mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1 + \mu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + L_2(w) \right] - \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0,$$

$$D(1 - \Gamma^*) \nabla^4 w + L_3(u, v, w) + (1 - \Gamma_1^*) \left( k_1 w - k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q,$$

Ushbu sistemani turli chegaraviy shartlarni e'tiborga olib yechish uchun fazoviy o'zgaruvchilar bo'yicha diskretlash tashkil qilinadi va natijada vaqtga nisbatan oddiy noxiziqli integro-differensial tenglamalar sistemasiga olib kelinadi

Keltirilgan tenglamalar sistemasi qovushqoq-elastik quvurlarning qovushqoq-elastik gruntli asos bilan o'zaro ta'sirini ifodalovchi integro-differensial tenglamalar sistemasi hisoblanadi. Bu sistemaning yechimlarini kvadratura formulalarga asoslangan sonli usul yordamida yechish algoritmi ishlab chiqilgan. Ishlab chiqilgan hisoblash algoritmi asosida Delphi kompyuter algoritmik tilida dastur yaratilgan va quyidagi natijalar olingan.



**3.3-rasm.** Quvur va asos materiallarining turli reologik parametrlarida quvurning markaziy nuqtasining ko'chishi ( $w$ ) vaqt bo'yicha o'zgarishlari:  
 $A = 0.0$  (1),  $A = 0.05$  (2),  
 $A = 0.1$  (3)

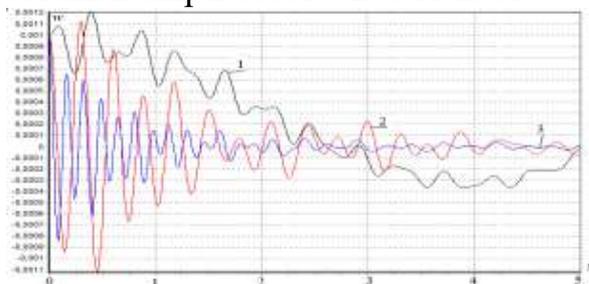
3.3-rasmda Pasternakning ikki parametrlil asos modeli asosida hisobga olingan quvur materiali yopishqoq-elastik xususiyatlarining «quvur + asos» tizimi

tebranish jarayoniga ta'sirini baholash natijalari keltirilgan. Grafikda egilish funksiyalari tasvirlangan: ordinata o'qi bo'ylab  $w$  funksiyasining qiymatlari, absissa o'qi bo'ylab esa o'lchamsiz vaqt parametri joylashtirilgan.

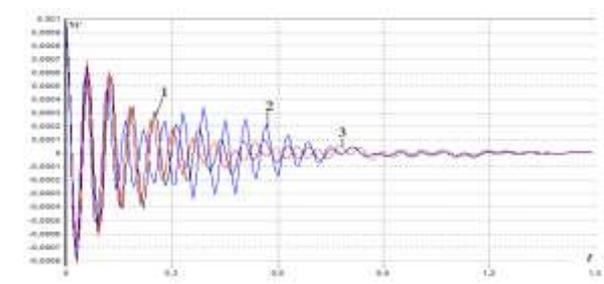
Olingan natijalardan ko'rinib turibdiki, agar quvur faqat elastik sifatida modellashtirilsa, "quvur + asos" kabi murakkab tizimning noxiziqli tebranishlari nisbatan sekin so'nadi. Biroq, agar quvur va asosning qovushqoq-elastik xususiyatlari bir vaqtda hisobga olinsa, tizimdagi tebranishlarning so'nish jarayoni sezilarli darajada tezlashadi.

3.4-rasmda quvurning noxiziqli tebranishiga asos parametrlarining ta'siri tekshirilgan, ya'ni:  $k_1$  va  $k_2$  ning turli qiymatlarida ko'chish  $w(t)$  ning funksiya grafigining vaqt bo'yicha o'zgarish natijalari keltirilgan.

Olingan natijalarning tahlilidan ma'lumki, grunt asosning qovushqoqligi tebranish amplitudasi yanada intensiv so'nishiga, tebranish chastotasining esa oshishiga olib keladi. Qiymatlari  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 3$  (3-egri chiziq) bo'lganda tebranish amplitudasi tezda so'nadi.



**3.4-rasm.** Sistemadagi (quvur+asos) asosning parametrlari turli qiymatlarida ( $k_1$  va  $k_2$ ) vaqt o'tishi bilan quvurning markaziy nuqtasining ko'chishi ( $w$ ) ning o'zgarishi



**3.5-rasm.** Sistemadagi (quvur+asos) suyuqlikning turli tezlik parametrlari qiymatlarida ( $M^* = 0.01$  (1),  $0.02$  (2),  $0.03$  (3)) vaqt o'tishi bilan qobiqning markaziy nuqtasining ko'chishi ( $w$ ) ning o'zgarishi

3.5-rasmda quvurning noxiziqli ko'ndalang tebranishi  $w$  ning quvur ichidagi suyuqlik tezligi  $U_0$  ni suyuqlikning tovush tezligi  $V_\infty$  ga nisbatining turli qiymatlarida vaqt bo'yicha olingan o'zgarish natijalari keltirilgan. Olingan natijalarning tahlilida ko'rinadiki suyuqlikning tezligi qancha katta bo'lsa quvurning tebranish amplitudasi shunchalik tez so'nadi.

## XULOSA

1. Mahalliy va xorijiy adabiyotlarda chop etilgan yupqa devorli silindrik konstruksiyalar dinamikasiga bag'ishlangan ilmiy ishlar batafsil o'rganilib tahlil qilindi.

2. Ichida ideal suyuqlik harakat qiluvchi silindrik konstruksiya dinamikasini baholash uchun Boltsman-Volteraning qovushqoq-elastik nazariyasiga va Kirxgof-Lyav gipotezasiga asoslangan matematik model ishlab chiqildi.

3. Matematik model bilan ifodalangan qovushqoq-elastik yupqa devorli silindrik konstruksiya dinamik masalasini yechishda Bubnov-Galerkin usulidan foydalanib, dinamik masalani boshlang'ich shartlar bilan birgalikda oddiy integro-differensial tenglamalar sistemasiga keltirildi va tenglamalar sistemasini yechish uchun kvadratura formulalarga asoslangan algoritm ishlab chiqildi.

4. Kvadratura formulari yordamida hosil qilingan algebraik tenglamalar sistemasi Gauss usuli yordamida yechilib, ishlab chiqilgan algoritm asosida "Delphi" dasturlash tilida amaliy dasturlar paketi yaratildi.

5. Ichidan suyuqlik harakatlanuvchi yupqa devorli silindrik konstruksiyaning dinamik holati qovushqoq-elastiklikning turli parametrlarida tahlil qilindi va olingan natijalar bo'yicha silindrning xavfli tebranish amplitudasini kamaytirish parametrlar aniqlandi.

6. Ichidan suyuqlik oqib o'tayotgan qovushqoq-elastik quvurlar dinamikasi noxiziqli masalasining matematik modeli va hisoblash algoritmi yaratildi.

7. Qovushqoq-elastik silindrik qobiqning dinamika masalalariga oid noxiziqli integro-differensial tenglamalar sistemani yechish uchun sonli usul va hisoblash algoritmi ishlab chiqildi.

8. Geometrik noxiziqlikni hisobga olingan holda quvur tebranishlariga fizik-mexanik parametrlarning ta'siri tekshirilib, suyuqlik oqimining kritik tezligini aniqlovchi mezon ko'rsatilib, suyuqlikning kritik tezliklari aniqlandi.

9. Ichidan pulsatsiyalik suyuqlik oqib o'tayotgan qovushqoq-elastik quvurlar dinamikasi noxiziqli masalasining matematik modeli va hisoblash algoritmi yaratildi.

10. Ishlab chiqilgan matematik model, algoritm va kompyuter dasturi orqali pulsatsiyali oqim va sistemaning qovushqoq-elastik xossalarini e'tiborga olgan holda, pulsatsiyalik oqim ta'siri natijasida murakkab sistemaning noxiziqli tebranishlari tekshirilgan.

Olingan natijalar asosida quyidagi mexanik effektlar aniqlandi:

- murakkab sistemadagi quvur va asosning qovushqoq-elastiklik xususiyati birgalikda e'tiborga olish noxiziqli tebranishning so'nish jarayoni tezlashadi;

- sistemaning qovushqoq-elastiklik xarakteristikalarini qancha katta bo'lsa sistemaning tebranish amplitudasi va chastotasi kamayib, quvurdagi tebranish so'nishining tezlashtiradi;

- quvur radiusi qanchalik kichik bo'lsa uning tebranish chastotasi shunchalik kichik bo'lib, tebranishning sekinlashtiradi, radiusning kattalashishi esa chastotani oshirib quvur tebranishini so'nishini tezlashtiradi;

- quvur ichida harakatlanayotgan suyuqlikning tezligi qancha katta bo'lsa quvurdagi tebranish amplitudasi shunchalik tez so'nadi;

- sistemaning qovushqoq-elastiklik xususiyatini e'tiborga olgan holda quvur atrofidagi asosning kattikligini oshirish quvurning amplitudasini kamaytirib tebranishning tez so'nishiga olib keladi.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ «ТИИИМСХ» НА  
ОСНОВЕ НАУЧНОГО СОВЕТА ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ  
СТЕПЕНЕЙ DSc.03/26.05.2022.Т.10.05**

---

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ИРРИГАЦИИ И  
МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА»**

**ТУРАЕВ ФОЗИЛЖОН ЖУРАКУЛОВИЧ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ  
ПРОЦЕССОВ ВЯЗКОУПРУГИХ ТРУБОПРОВОДОВ С  
ПРОТЕКАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ**

05.01.07 – Математическое моделирование.  
Численные методы и комплексы программ.  
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ташкент - 2025



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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире трубопроводный транспорт газа, нефти и нефтепродуктов является одним из важных показателей стремительного развития отраслей экономики стран. Трубопроводный транспорт отличается от других видов транспорта своей экономической эффективностью, экологической безопасностью и бесперебойностью поставок газа и нефтепродуктов на промышленные объекты. При трубопроводном транспорте колебательные процессы, возникающие в трубах под воздействием различных внешних и внутренних воздействий, могут привести к аварийным повреждениям. В результате промышленные объекты несут значительный экономический ущерб и приводят к ухудшению состояния окружающей среды, а также могут представлять угрозу для жизни людей. Поэтому исследования динамических процессов, возникающих в цилиндрических трубах, остается одной из актуальных проблем. Постоянное изменение и усложнение технических конструкций, развитие материаловедения имеют большое значение для развития теории и практики математического моделирования. Примером этих процессов является сложность технологического проектирования и производства тонкостенных конструкций, предназначенных для условий больших потоков, в том числе газо- и нефтепроводов. Создание и применение новых видов материалов, в том числе композиционных, является существенным фактором развития в этом направлении. Исследователи из стран США, России, Канады, Европы и развитых стран Азии, уделяют особое внимание изучению процесса колебаний цилиндрических композитных труб, транспортирующих жидкости, с учетом вязкоупругих свойств.

В мире ведутся обширные научные исследования, посвященные исследованию тонкостенных труб большого диаметра с внутренним давлением более 10 МПа не только в виде стержней или балок, но и также в виде цилиндрических оболочек. Для исследования цилиндрических труб большого диаметра применяется теория тонких оболочек, учитывающая взаимодействие внутренней и внешней среды в конструкции. Применение методов математического моделирования является важным инструментом при решении задач, связанных с колебательными процессами в цилиндрических композитных трубах оболочечного типа, особенно в условиях сложной рабочей среды. Учет вязкоупругих свойств материала трубы позволяет значительно повысить точность получаемых практических результатов. В связи с этим одной из актуальных задач является разработка новых математических моделей для описания линейных и нелинейных динамических процессов, создание эффективных алгоритмов численного решения и соответствующих компьютерных программ. При этом особое внимание необходимо уделить учёту специфики взаимодействия компонентов напряжённо-деформированного состояния, включая вязкоупругие свойства материала, а также моделированию динамики цилиндрических оболочек, представляющих собой газо- и нефтепроводы.

В настоящее время в нашей республике особое внимание уделяется проектированию и строительству композитных и полимерно-композитных трубопроводных систем в химической промышленности, нефтегазовых сетях и жилищно-коммунальном хозяйстве. Постановлением Президента Республики Узбекистана определены задачи «...строительства, реконструкции и ремонта сетей питьевого водоснабжения, канализации... сетей природного газа...»<sup>2</sup>. В реализации этой задачи важное научное значение имеет разработка динамических методов, алгоритмов и вычислительных программ для решения задач колебательных процессов водосбросных трубопроводов сетей нефтегазовой промышленности, предприятий водоснабжения и гидротехнических сооружений.

Данное диссертационное исследование в определенной мере способствует реализации задач, обозначенных в Указе Президента Республики Узбекистан «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы» №УП-60 от 28 января 2022 года, в постановлениях Президента Республики Узбекистан «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области математики» № ПП-4708 от 7 мая 2020 года, «О мерах по совершенствованию системы организации и проведения геологоразведочных работ на нефть и газ» № ПП-4522 от 11 ноября 2019 года, «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы охраны водных объектов» № ПП-3286 от 25 сентября 2017 года и других нормативно-правовых актах, связанных с данной деятельностью.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в рамках приоритетного направления развития науки и технологий республики IV. «Математика, механика, сейсמודинамика сооружений и информатика».

**Степень изученности проблемы.** В последние годы ведутся исследования, посвящённые изучению колебательных процессов в трубах в виде упругих цилиндрических оболочек. В частности, это отражено в научных трудах таких учёных, как М.П. Пайдуссис, Р.А. Ибрагим, Марко Амабили, В.В. Болотин, М.А. Ильгамов, А.С. Волмир, М.С. Грач, С.Г. Шульман, И.С. Фанг, И.А. Харингс, Э.И. Ньордсон, И.П. Денис, Д.С. Уивер и Т.Е. Энни. Среди учёных Республики можно отметить Т. Рашидова, Т. Ширинкулова, Ф. Бадалова, Х. Эшматова, М. Мирсаидова, К. Султонова, И.И. Сафарова, Х. Худайназарова, Т. Мавлянова, Б.А. Худаярова, Р.А. Абдикаримова, М.К. Усарова, которые проводили исследования по вопросам колебаний и прочности упругих и вязкоупругих труб стержневого и цилиндрического типов.

В то же время колебательные процессы в трубах типа цилиндрических оболочек, изготовленных из материалов с вязкоупругими свойствами, до сих пор недостаточно исследованы. Отсутствуют эффективные математические

---

<sup>2</sup> Постановление Президента Республики Узбекистан от 18 декабря 2020 года № ПП-4929 «О мерах по дальнейшему развитию инженерно-коммуникационной инфраструктуры в регионах»

модели колебательного процесса вязкоупругой трубы типа цилиндрической оболочки, по которой течёт пульсирующая жидкость в геометрически нелинейной постановке. Вопросы, касающиеся воздействия пульсирующего потока на цилиндрические трубы, колебаний труб с одно- и двухпараметрическим основанием, методики определения критической скорости потока жидкости, а также вычислительные методы решения задач моделирования, остаются недостаточно проработанными и развитыми.

Поэтому требуется разработка эффективных математических моделей и вычислительных алгоритмов, адекватно описывающих процессы и явления, происходящие в вязкоупругих цилиндрических конструкциях.

**Связь диссертационного исследования с планом научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где была выполнена диссертация.**

Диссертационная работа выполнена в рамках проекта Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства QXA-13-001 «Математическое моделирование процесса колебаний вязкоупругих труб при течении по ним жидкости» (2015-2017 гг.) и научно-исследовательской темы института №2018-224 «Решения дифференциальных уравнений и их приложение к инженерным задачам» (2017-2020 гг.).

**Целью исследования** является создание математических моделей, методов, вычислительных алгоритмов и компьютерных программ для анализа процессов колебаний вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек при протекании через неё жидкости.

**Задачи исследований:**

- разработка математических моделей линейных и нелинейных колебаний вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек, с протекающей через них жидкостью, с учётом взаимодействия с основанием на основе различных моделей (Винклера, Пастернака);
- разработка дискретных моделей задач колебаний вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек с протекающей через них жидкостью;
- разработка вычислительных алгоритмов, обеспечивающие устойчивость расчётного процесса на моделях, учитывающие необходимую точность решений задач колебаний вязкоупругих труб и особенности теории вязко-упругости;
- решение задач о колебаниях вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек с протекающей по ним жидкостью и анализ полученных результатов.

**Объектом исследования** являются колебательные процессы вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек при протекании по ним жидкости.

**Предметом исследования** являются математическая модель, методы расчёта, алгоритмы и компьютерные программы для моделирования колебательных процессов вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек при протекании по ним жидкости.

**Методы исследования.** Использовались методы теории вязкоупругости; математические методы теории цилиндрических оболочек; методы численного решения интегральных и интегро-дифференциальных уравнений; методы разработки прикладных комплексных компьютерных программ и проведения вычислительных экспериментов.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработаны математические модели процесса линейных колебаний вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек с протекающей по ним жидкостью с учетом взаимодействия с основанием и использованием моделей Винклера и Пастернака;

разработаны вычислительные алгоритмы, обеспечивающие устойчивость вычислительного процесса в моделях, учитывающих необходимую точность решения задач о колебаниях вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек и их специфику в теории вязкоупругости;

разработаны математические модели процесса нелинейных колебаний вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек с протекающей по ним жидкостью с учетом взаимодействия с основанием и использованием моделей Винклера и Пастернака;

на основе алгоритмов создан комплекс компьютерных программ для решения класса задач моделирования колебательных процессов вязкоупругих труб типа цилиндрических оболочек.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследования обоснована использованием теории вязкоупругости, теории цилиндрических оболочек, численных методов решения интегро-дифференциальных уравнений. Результаты исследования колебательных процессов в цилиндрических трубах сопоставлены с результатами авторов, опубликованными в зарубежных научных журналах, а численные решения в частных случаях сравнивались с аналитическими решениями

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследований заключается в разработке уравнений движения и вычислительных алгоритмов колебаний цилиндрических труб, по которым протекает жидкость, на основе интегральных моделей теории деформируемой вязкоупругости. Разработанные математические модели, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение представляют собой важный вклад в теорию математического моделирования, а также могут быть использованы при проектировании нефтегазопроводов и водоотводных труб гидротехнических сооружений.

Практическая значимость результатов исследований заключается в разработке математических моделей, алгоритмов расчёта и компьютерных программ, а также получение новых результатов с учётом вязкоупругих свойств материала трубы и грунтового основания типа цилиндрической оболочки, которые могут быть применены при решении задач в области водного хозяйства, химической промышленности и нефтегазового сектора, а также в образовательном процессе.

**Реализация результатов исследования.** На основании полученных результатов математическое моделирование колебательных процессов вязкоупругих трубопроводов с протекающей жидкостью:

- воздействие грунтового основания на колебательный процесс вязкоупругих труб цилиндрической оболочечной формы, по которым протекает жидкость, с учетом моделей Винклера и Пастернака, внедрено в расчет прочности и устойчивости труб насосных станций фермерского хозяйства "Тиркашев Юсуф", относящегося к Управлению ирригационной системы Оксув. Это позволило сократить время инженерных расчетов, необходимых для определения прочности труб в 1.5 раза (справка Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан №NK16184435 от 10 февраля 2022 года);

- математические модели колебательных процессов вязкоупругих труб цилиндрической оболочечной формы, алгоритмы расчетов, основанные на рациональной замене особенностей в сингулярных интегро-дифференциальных уравнениях с особым ядром и использовании квадратурных формул, а также созданные компьютерные программы внедрены в учебный процесс Национального исследовательского университета "ТИИИМСХ" (справка Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан №NK16184435 от 10 февраля 2022 года). В результате студенты получили возможность получать решения задач по передаче жидкости в вязкоупругих трубах в числовом и графическом виде;

- математическая модель, метод расчета и алгоритмическая программа для изучения нелинейных колебаний цилиндрических труб, по которым протекает пульсирующая жидкость, с учетом грунтового основания по моделям Винклера и Пастернака, внедрены для труб водосброса Чимкурганского водохранилища (справка Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан №NK16184435 от 10 февраля 2022 года). В результате появилась возможность оценки воздействия пульсирующего потока, возникающего в трубах водосброса Чимкурганского водохранилища;

- комплекс программ, математическая модель и метод расчета для исследования колебательных процессов цилиндрических труб, по которым протекает пульсирующая жидкость, с учетом вязкоупругих свойств и моделей Винклера и Пастернака, внедрены в расчеты прочности труб водосброса насосных станций, относящихся к Бассейновому управлению ирригационных систем Аму-Кашкадарьи (справка Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан №NK16184435 от 10 февраля 2022 года). В результате появилась возможность определения переменной скорости потока, изменения давления в трубах и оценки их пригодности в насосных станциях.

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования обсуждались на 4 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 1 монография, 7 статей в научных изданиях, предложенных Высшей аттестационной комиссией

Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора философии (PhD), в том числе 2 в республиканских и 5 в зарубежных научных журналах. На республиканских конференциях опубликовано 4 статьи, на зарубежных – 4, получены 2 свидетельства о регистрации программ созданных для ЭВМ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объём диссертации составляет 111 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и необходимость темы диссертации, описаны цель и задачи исследования, объект и предмет исследования. Раскрыт уровень изученности проблемы и её связь с планом научных исследований. Представлены методы проведения исследования, изложены научная новизна и практические результаты, показано научное и практическое значение полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов в практику, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной «**Математическая модель и метод расчёта для оценки линейной динамики вязкоупругих цилиндрических труб**», рассмотрено текущее состояние проблемы. Приведены дифференциальные и интегральные модели, описывающие связь между напряжениями и деформациями в теории вязкоупругости. На основе известных принципов проведён анализ их достоинств и недостатков. Также разработана математическая модель для оценки динамики цилиндрической конструкции, с протекающей через нее жидкостью, основанная на теории вязкоупругости Больцмана-Вольтерры и гипотезе Кирхгофа-Лява. Для численного решения полученной системы интегро-дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями предложен метод расчёта, основанный на использовании квадратурных формул, а также разработаны алгоритм и комплекс прикладных программ. Динамическое состояние тонкостенной цилиндрической конструкции, по которой протекает жидкость, были проанализированы при различных параметрах вязкоупругости. По результатам анализа показана возможность снижения опасной амплитуды колебаний цилиндра.

Разработка математических моделей динамических задач колебаний и устойчивости вязкоупругих систем с учетом геометрии цилиндрических оболочек в настоящее время весьма актуальна, поскольку расширяются возможности использования материалов с вязкоупругими свойствами в различных областях практики.

Основными принципами выбора моделей на основе предлагаемого метода моделирования задачи наследственной теории вязкоупругости являются:

- адекватность интегральных моделей, связывающих напряжения и деформации в реальных условиях;
- адекватность математических моделей, созданных на основе различных теорий;
- эффективность аналитических и численных методов, обеспечивающих решения с высокой точностью нелинейных интегро-дифференциальных уравнений с сингулярным ядром;
- эффективность пакета прикладных программ, позволяющего исследовать класс нелинейных динамических задач.

В настоящее время многими ведущими учеными признано, что интегральная модель связи между напряжениями и деформациями в вязкоупругих телах адекватно описывается наследственной теорией вязкоупругости Больцмана-Вольтерры со слабым сингулярным ядром. (таблица 1)

Выбор интегральной модели Больцмана-Вольтерры для наследственной задачи вязкоупругости обусловлен следующими соображениями:

- она адекватно описывает физические процессы;
- универсальна с точки зрения возможности применения к очень широкому классу нелинейных динамических задач наследственной теории вязкоупругости.

Таблица 1

**Модели наследственной теории вязкоупругости**

№.	Виды моделей	Названия моделей
1.	$P(\sigma) = Q(\varepsilon)$ $P, Q$ – линейные дифференциальные операторы: $\left\{ \begin{matrix} P \\ Q \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} a_n \\ b_n \end{matrix} \right\} \frac{d^n}{dt^n} + \left\{ \begin{matrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{matrix} \right\} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + \left\{ \begin{matrix} a_0 \\ b_0 \end{matrix} \right\}$	Дифференциальная модель
2.	$a_0\sigma + a_1\dot{\sigma} = b_0\varepsilon + b_1\dot{\varepsilon}$	Стандартная модель вязкоупругого тела
3.	$\sigma(t) = E \left[ \varepsilon(t) - \int_0^t R(t-\tau)\varepsilon(\tau) d\tau \right]$	Модель Больцмана – Вольтерры

Интегральную модель Больцмана-Вольтерры, выражающую закон изменения между напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$  и деформаций  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$  представим в интегральной форме:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (1-R^*) (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (1-R^*) (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) \tag{1}$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} (1-R^*) \varepsilon_{xy}, \quad R^* \varepsilon = \int_0^t R(t-\tau)\varepsilon(\tau) d\tau$$

где  $E$  - модуль упругости;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $R^*$  - интегральный оператор с ядром релаксации  $R(t)$ ;  $t$  - время наблюдения;  $\tau$  - время до момента наблюдения;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$  - компоненты конечной деформации.

Точность численных решений зависит от правильного выбора ядра релаксации. Во многих инженерных исследованиях используется экспоненциальное ядро или ядро в виде суммы экспонент (табл.2). Выбор ядра релаксации в виде экспоненты или суммы экспонент позволяет свести интегральную модель к исходной модели связи напряжений и деформаций, т.е. к дифференциальной модели (табл.1). В начальный момент времени ( $t=0$ ) эти ядра релаксации имеют конечное значение, поскольку, как показали многочисленные исследования, не отражают свойств, наблюдаемых в начале релаксационных процессов  $R(0) \rightarrow \infty$ . Поэтому вопрос выбора слабо сингулярного ядра со специальным свойством для формирования интегральных моделей, отражающих связь напряжений и деформаций в материалах с вязкоупругими свойствами и обеспечивающих адекватность, является одним из важных аспектов построения математических моделей рассматриваемых задач.

Таблица 2

**Ядра релаксации наследственной теории вязкоупругости**

№	Вид ядра	Названия ядра
1.	$R(t) = A \exp(-\beta \cdot t), \quad A > 0, \quad \beta > 0$	Экспоненциальное ядро
2.	$R(t) = \sum_{i=1}^n A_i \exp(-\beta_i \cdot t), \quad A_i > 0, \quad \beta_i > 0$	Ядро в виде суммы экспонент
3.	$R(t) = A \cdot \exp(-\beta \cdot t) \cdot t^{\alpha-1},$ $A > 0, \quad \beta > 0, \quad 0 < \alpha < 1$	Ядро Колтунова-Ржаницына

Слабо-сингулярным ядром с наиболее распространенной особенностью типа Абеля является ядро Колтунова-Ржаницына:

$$R(t) = A \cdot \exp(-\beta \cdot t) \cdot t^{\alpha-1}, \quad A > 0, \quad \beta > 0, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (2)$$

где  $A$  - параметр вязкости,  $\alpha$  - параметр сингулярности, а  $\beta$  - параметр затухания.

Точность аппроксимаций ядер проверяется путём сравнения с экспериментальными результатами. Трёхпараметрическое наследственное сингулярное ядро Колтунова-Ржаницына удовлетворяет всем существующим условиям, накладываемым на ядра релаксации, и наилучшим образом аппроксимирует экспериментальные результаты на большом временном интервале. Поэтому для решения динамических задач наследственно деформируемых систем используется интегральная модель Больцмана-Вольтерра, выражающая связь между напряжениями и деформациями с

помощью наследственного слабого сингулярного ядра Колтунова-Ржаницына.

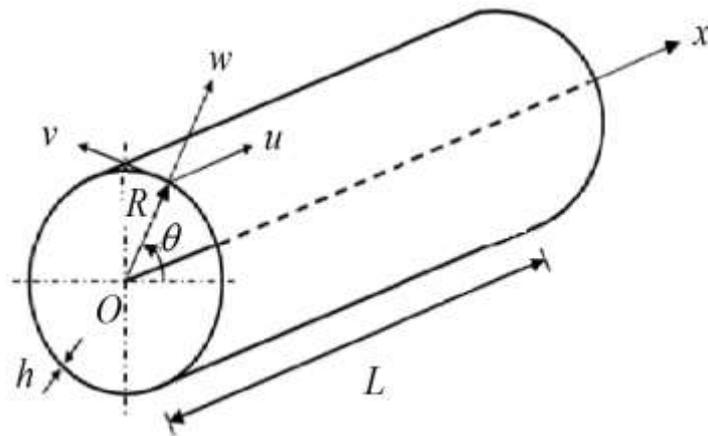
Во второй главе диссертации под названием «**Нелинейные колебания вязкоупругих цилиндрических оболочек с протекающей в них жидкостью**» построена математическая модель динамики вязкоупругих цилиндрических труб с протекающей через них жидкостью с учетом геометрической нелинейности. Для решения задачи предложен численный метод, основанный на использовании квадратурных формул, и разработан алгоритм численного решения. Для проверки достоверности полученных результатов решены тестовые задачи. При различных значениях геометрических и физических параметров трубы исследованы различные внешние и внутренние воздействия на нелинейную динамику цилиндрической оболочки, приведен критерий определения критической скорости течения жидкости и определены критические скорости течения жидкости.

Уравнение движения трубы для тонкостенной вязкоупругой цилиндрической оболочки (рис. 1) с протекающей внутри с постоянной скоростью жидкостью имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Eh}{1-\mu^2}(1-R^*)\{L_{11}u + L_{12}v + L_{13}w\} = \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{Eh}{1-\mu^2}(1-R^*)\{L_{21}u + L_{22}v + L_{23}w\} = \rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ \frac{Eh}{1-\mu^2}(1-R^*)\{L_{31}u + L_{32}v + L_{33}w\} = q - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \end{array} \right. \quad (3)$$

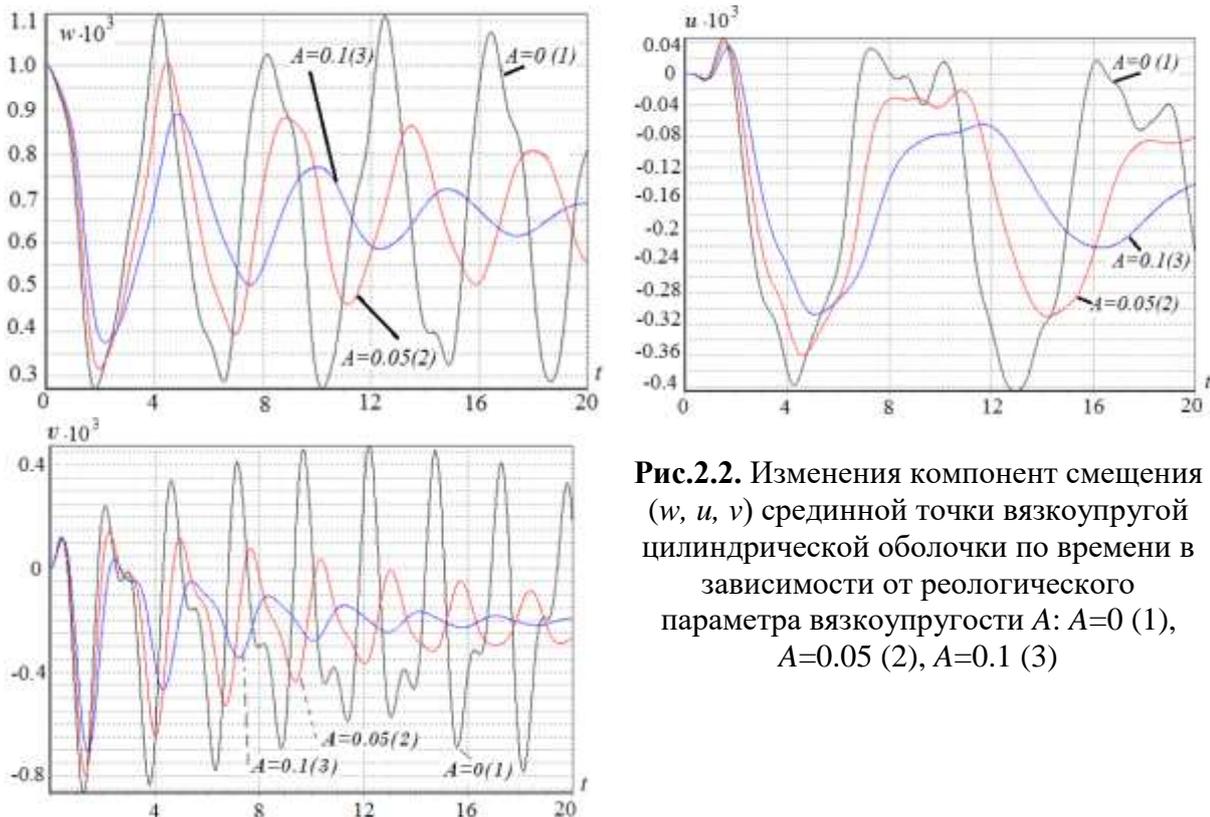
где  $\rho$  - плотность материала трубы,  $h$  - толщина трубы,  $q$  - давление жидкости на стенку оболочки

$$\begin{aligned} L_{11} &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}, & L_{22} &= \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}, \\ L_{12} = L_{21} &= \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2}{\partial x \partial \theta}, & L_{33} &= \frac{1}{R^2} + \frac{h^2}{12} \left( \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{1}{R^2} \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{R^4} \frac{\partial^4}{\partial \theta^4} \right), \\ L_{13} = L_{31} &= -\frac{\mu}{R} \frac{\partial}{\partial x}, & L_{23} = L_{32} &= -\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta}, \end{aligned} \quad (4)$$

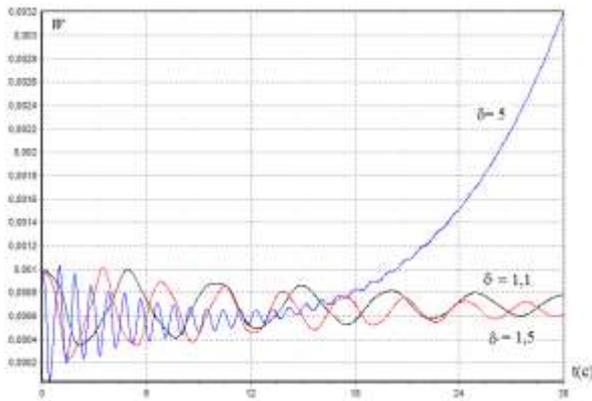


**Рис.2.1.** Схема цилиндрической оболочки

На рис 2.2 (а, б, в) показаны изменения компонент смещения  $w$ ,  $u$ ,  $v$  по времени срединной точки цилиндрической оболочки в зависимости от параметра вязкоупругости  $A$ . Из графиков видно, что учёт вязкоупругих свойств материала оболочки приводит к затуханию процесса колебаний, при этом решения упругой и вязкоупругой задач в начальный момент времени мало отличаются друг от друга, но с течением времени вязкоупругие свойства начинают оказывать существенное влияние.



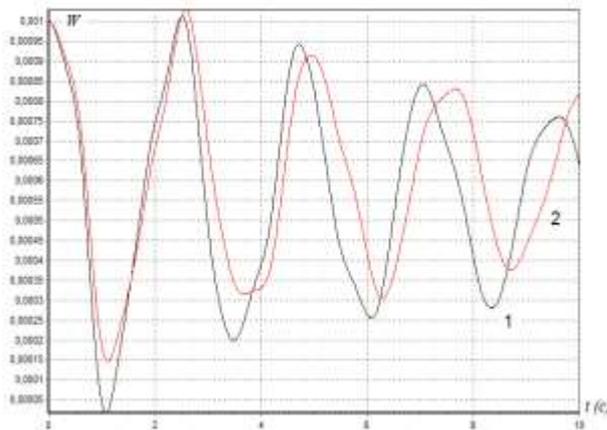
**Рис.2.2.** Изменения компонент смещения ( $w$ ,  $u$ ,  $v$ ) срединной точки вязкоупругой цилиндрической оболочки по времени в зависимости от реологического параметра вязкоупругости  $A$ :  $A=0$  (1),  $A=0.05$  (2),  $A=0.1$  (3)



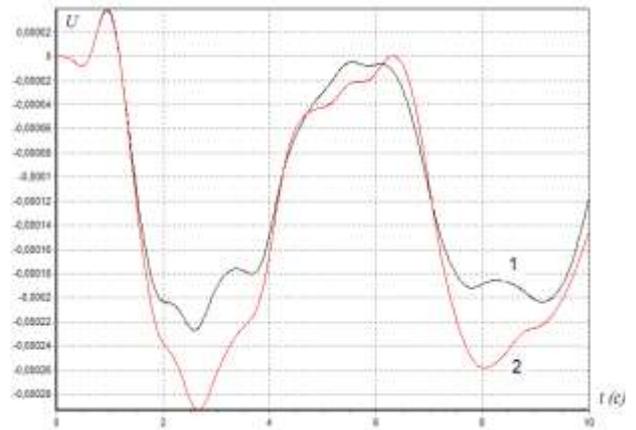
**Рис.2.3.** Изменение компоненты смещения  $w$  в срединной точке вязкоупругой цилиндрической оболочки по времени в зависимости от геометрического параметра  $\delta$ :  $\delta=1.1$  (1),  $\delta=1.5$  (2),  $\delta=5$  (3)

На рис.2.3 показана зависимость прогиба вязкоупругой трубы  $w$  от времени при различных значениях параметра  $\delta = R/h$ . Из анализа представленных кривых следует, что уменьшение толщины трубы  $\delta$  приводит к увеличению частоты колебаний. Наблюдается, что амплитуда изгиба трубы существенно увеличивается при  $\delta = 5$  (кривая 3).

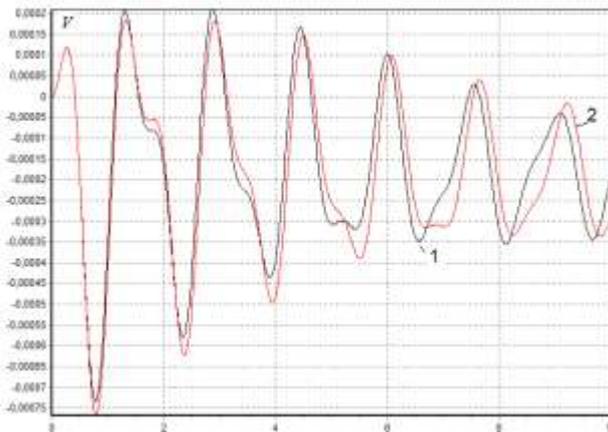
На рис. 2.4-2.6 представлены кривые зависимости перемещений точки  $w$  цилиндрической оболочечной вязкоупругой трубы (рис.2.4),  $u$  (рис.2.5),  $v$  (рис. 2.6) по времени, полученные по линейной (кривая 1) и нелинейной теориям (кривая 2). Анализ показал, что различия в полученных результатах возникают лишь по мере увеличения толщины оболочки (рис.2.4). При этом показано, что в начальный момент времени линейная и нелинейная задачи мало отличаются друг от друга, а свойства геометрической нелинейности оказывают существенное влияние на решение с течением времени.



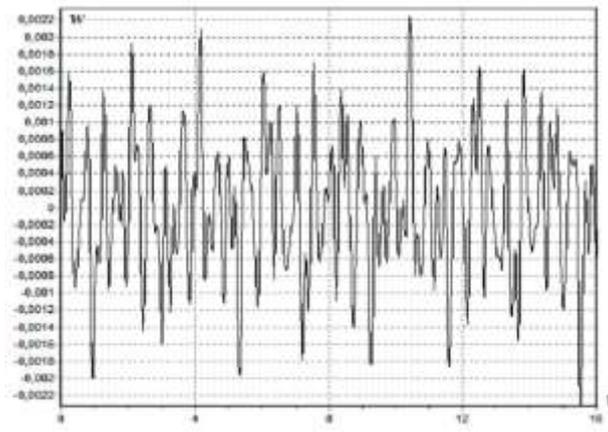
**Рис.2.4.** Изменение компоненты смещения  $w$  в срединной точке вязкоупругой цилиндрической оболочки по времени, в геометрически линейной (1) и геометрически нелинейной (2) задачах



**Рис.2.5.** Изменение компоненты смещения  $u$  в срединной точке вязкоупругой цилиндрической оболочки по времени, в геометрически линейной (1) и геометрически нелинейной (2) задачах



**Рис.2.6.** Изменение компоненты смещения  $v$  срединной точки вязкоупругой цилиндрической оболочки по времени, в геометрически линейной (1) и геометрически нелинейной (2) задачах



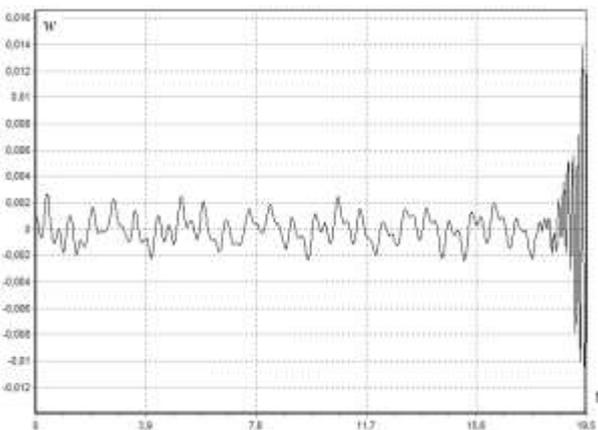
**Рис.2.7.** Изменение компоненты смещения  $w$  срединной точки вязкоупругой цилиндрической оболочки по времени в случае  $v^* = v_{cr}^*$

В качестве критерия определения критической скорости течения жидкости выбрана верхняя определённая граница  $\{V\}$  множества скоростей, при которой обеспечивается сходимость ряда Бубнова-Галеркина при условии  $t \geq 0$ , то есть выполняется следующее условие:

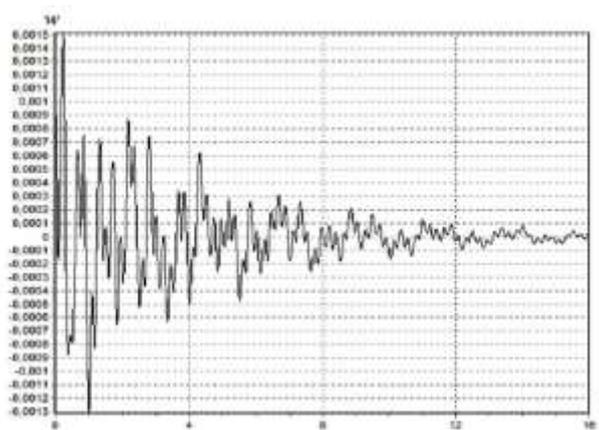
$$w(x, y, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_{nm}(t) \phi_{nm}(x, y) > 1 \quad (5)$$

здесь  $w_{nm}(t)$  - является функцией, зависящей от времени;  $\phi_{nm}(x, y)$  - является функцией координат, которая зависит от граничных условий.

В рис.2.7 критерием определения критической скорости потока жидкости является скорость, при которой амплитуда колебаний изменяется по гармоническому закону.



**Рис.2.8.** Изменение компоненты смещения  $w$  срединной точки вязкоупругой цилиндрической оболочки по времени в случае  $v^* > v_{cr}^*$



**Рис.2.9.** Изменение компоненты смещения  $w$  срединной точки вязкоупругой цилиндрической оболочки по времени в случае  $v^* < v_{cr}^*$

На рис.2.8 показано, что при скорости  $v^* > v_{cr}^*$  возникают интенсивно нарастающие амплитудные колебательные движения, приводящие в результате к разрушению конструкции.

На рис.2.9 скорость  $v_{cr}^*$  называется критической, если выполняется условие  $v^* < v_{cr}^*$ , при котором труба теряет устойчивость прямолинейного равновесия. При скорости потока меньше критической скорости  $v^* < v_{cr}^*$  наблюдается затухание амплитуды колебаний.

Влияние реологических параметров на критическую скорость жидкости показано в табл.3. Из анализа представленных результатов видно, что критическое значение скорости жидкости в упругом ( $A=0$ ) и вязкоупругом состоянии ( $A=0.1$ ) составляет 25.08 и 14.19 соответственно. Таким образом, учет вязкоупругих свойств материала конструкции приводит к снижению критической скорости жидкости.

Также в табл.3 проверена численная аппроксимация метода Бубнова-Галеркина. При  $M = 5$  критическая скорость равна 23.47; при  $M = 6$  эта скорость равна 24.34. Разница между ними составляет около 3.7%. Дальнейшее увеличение значения  $M$ , характеризующего форму изгиба оболочки, не оказывает существенного влияния на критическую скорость жидкости.

Таблица 3

**Влияние реологических параметров на критическую скорость жидкости**

$A$	$\alpha$	$\beta$	$M$	$U_{кр} (м/с)$
0				25.08
0.01	0.25	0.005	5	23.43
0.1				14.19
0.01	0.15	0.005	5	24.42
	0.4			24.40
	0.5			24.40
	0.7			24.39
0.01	0.25	0.001	5	24.16
		0.007		23.40
0.01	0.25	0.004	3	14.67
			4	21.92
			5	23.47
			6	24.34
			7	24.41

В третьей главе диссертации под названием «**Математическая модель нелинейных колебательных процессов сложной вязкоупругой системы (цилиндрической трубы и основания) с протекающей через нее жидкостью, метод расчета, алгоритм и анализ полученных результатов**» разработана математическая модель на основе интегро-дифференциальных уравнений, представляющая нелинейную динамику цилиндрической трубы с протекающей через нее пульсирующей жидкостью, а также разработаны алгоритм численного решения полученных нелинейных интегро-дифференциальных уравнений с использованием квадратурных формул и

компьютерных програм. С использованием разработанных математических моделей, алгоритмов и компьютерных програм исследованы нелинейные колебания вязкоупругой сложной системы при воздействии пульсирующего течения. На основе полученных результатов выявлены новые механические эффекты.

Разработка математических моделей, методов решения и оценка динамики цилиндрических труб под действием пульсирующих нагрузок в настоящее время является весьма актуальной и необходимой задачей, требующей своего решения.

Рассмотрим вязкоупругий трубопровод для жидкости и газа, представляющий собой цилиндрическую оболочку толщиной  $h$  и длиной  $L$ . Пусть внутри трубопровода пульсирует жидкость со скоростью  $U(t)$ , т.е.:

$$U(t) = U_0(1 + \lambda \cos \varphi t) \quad (6)$$

Здесь  $\lambda$  - параметр возбуждения (амплитуда пульсирующей жидкости);  $\varphi$  - частота пульсации.

Система интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, отражающая динамический процесс в цилиндрической трубе, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} (1 - \Gamma^*) \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1 - \mu}{2R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1 + \mu}{2R} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + L_1(w) \right] &= \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ (1 - \Gamma^*) \left[ \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1 - \mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1 + \mu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + L_2(w) \right] &= \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ D(1 - \Gamma^*) \nabla^4 w + L_3(u, v, w) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \\ = -\Phi^* \rho \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + U_0^2 (1 + \lambda \cos \varphi t)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] & \quad (7) \end{aligned}$$

Для этих уравнений граничные и начальные условия будут следующими:

$$\text{при } x = 0 \text{ и } x = L: w = 0, v = 0, M_x = 0, N_x = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u(x, y, 0) = \phi_1(x, y), \quad \dot{u}(x, y, 0) = \psi_1(x, y), \\ v(x, y, 0) = \phi_2(x, y), \quad \dot{v}(x, y, 0) = \psi_2(x, y), \\ w(x, y, 0) = \phi_3(x, y), \quad \dot{w}(x, y, 0) = \psi_3(x, y) \end{aligned} \quad (9)$$

Данная система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (7) совместно с граничными условиями (8) и начальными условиями (9) представляет собой математическую модель параметрических колебаний вязкоупругих труб большого диаметра с пульсирующим потоком жидкости.

Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений (7) со слабо сингулярными ядрами представляет собой математически сложную задачу. Поэтому метод решения этой системы основывается на их дискретизации по пространственным переменным и формировании системы нелинейных дифференциальных уравнений, разрешаемых относительно функций времени. После подстановки приведенных ниже выражений в

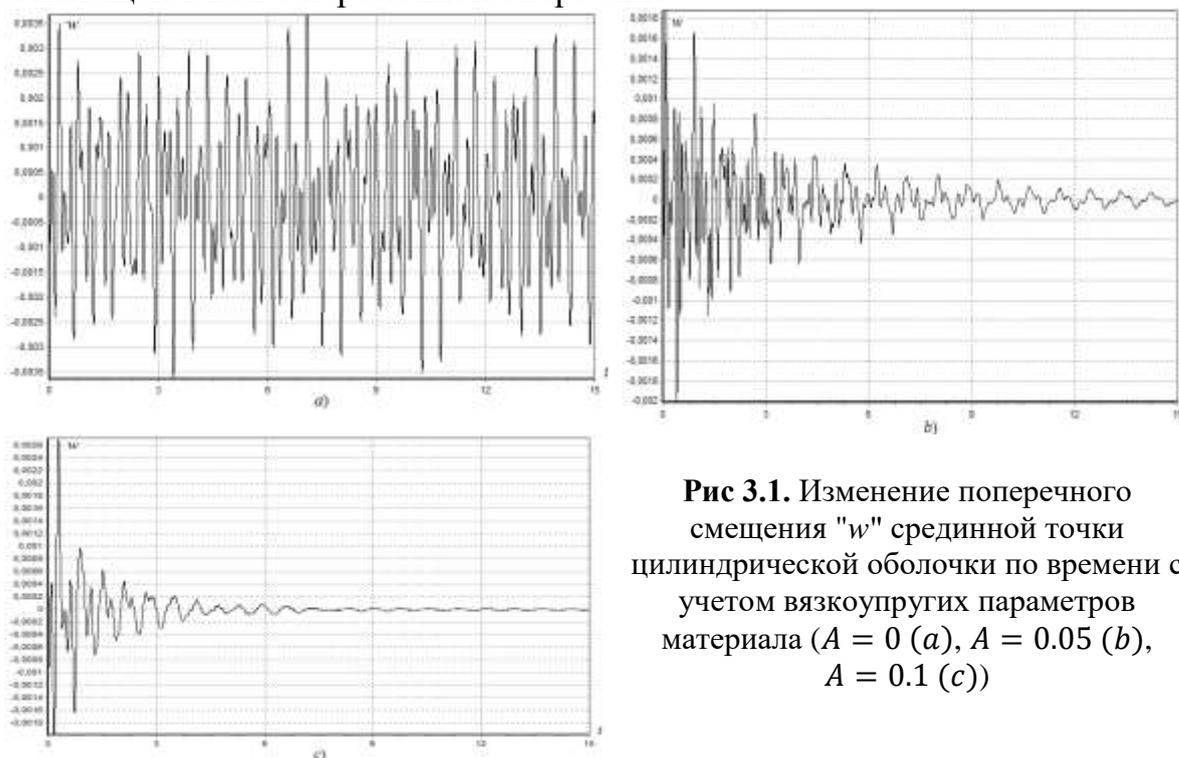
систему уравнений (7) и применения метода Бубнова-Галёркина получена система нелинейных обыкновенных интегро-дифференциальных уравнений, зависящая только от времени, а также предложен метод и разработан алгоритм численного решения системы с использованием квадратурных формул с учетом начальных условий.

$$u(x, y, \theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_{nm}(t) \cos \frac{n\pi x}{L} \sin(m\theta),$$

$$v(x, y, \theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M v_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{L} \cos(m\theta),$$

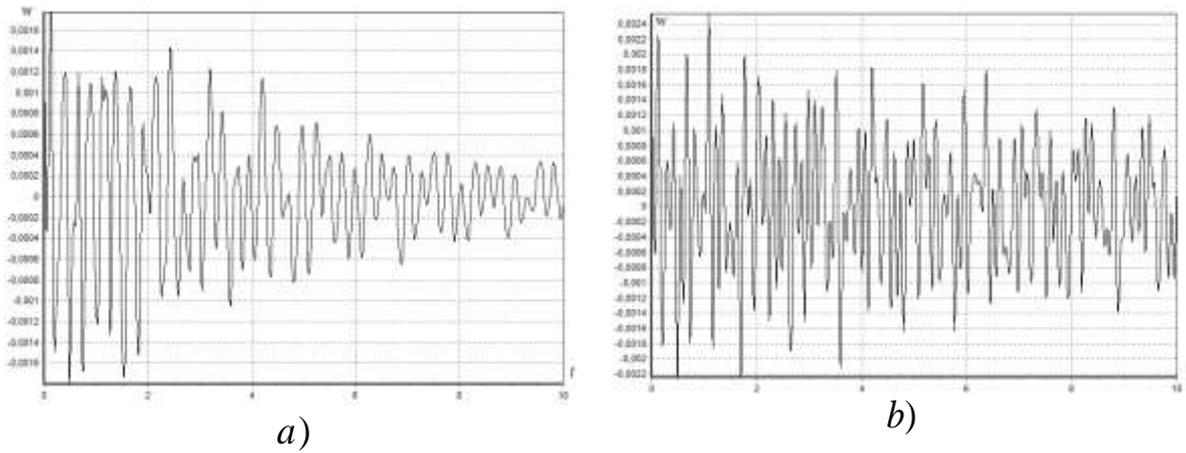
$$w(x, y, \theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{L} \sin(m\theta)$$

С использованием разработанных выше метода расчета, алгоритма и компьютерных программ исследованы динамические процессы в вязкоупругих цилиндрических трубах под воздействием жидкости, протекающей в ней с переменной скоростью.



**Рис 3.1.** Изменение поперечного смещения "w" срединной точки цилиндрической оболочки по времени с учетом вязкоупругих параметров материала ( $A = 0$  (a),  $A = 0.05$  (b),  $A = 0.1$  (c))

На рис. 3.1 представлены графики зависимости поперечного смещения "w" цилиндрических оболочек от времени в упругой (при  $A = 0$ : график a) и вязкоупругой ( $A = 0.05, 0.1$ : графики b) и c) постановках. Из графиков видно, что в упругой постановке затухание при колебаниях не происходит. При вязкоупругом материале (рис. 3.1- b, c) затухание в процессе колебания происходит в разной степени. Чем больше значение реологического параметра  $A$  ( $A = 0.05, 0.1$ ), тем быстрее затухают колебания по времени.



**Рис.3.2.** Графики изменения во времени поперечного смещения “ $w$ ” срединной точки вязкоупругой цилиндрической оболочки при различных значениях частоты пульсирующего потока ( $\varphi = 75 \text{ Hz}$  (a),  $150 \text{ Hz}$  (b))

На рис.3.2 показано влияние частоты пульсирующего потока  $\varphi$  на процесс колебаний цилиндрической оболочки. Из графика (рис.3.2-а, б) видно, что при более низких частотах пульсирующей жидкости наблюдается относительно медленное затухание амплитуды колебаний. Отметим, что при некоторых значениях частоты пульсаций наблюдается быстрый рост амплитуды колебаний во времени. Это можно объяснить приближением частоты пульсирующего потока к частоте собственных колебаний трубы, что может привести к резонансу.

Далее исследуются нелинейные колебания цилиндрической трубы с протекающей в ней жидкости с учетом вязкоупругого грунтового основания. В настоящее время разработано множество теорий, направленных на совершенствование механической модели грунтового основания. Так, вслед за простой моделью Винклера была предложена более сложная двухпараметрическая модель Пастернака, учитывающая вязкоупругие свойства основания. Данная модель, с одной стороны, незначительно усложняет математическую постановку задачи по сравнению с моделью Винклера, а с другой - позволяет учитывать, как дисперсионные свойства грунта, так и взаимодействие тонкостенной вязкоупругой цилиндрической оболочки, по внутренней полости которой течет идеальная жидкость с постоянной скоростью, с основанием.

Жидкость имеет скорость  $U$ , и ее направление совпадает с направлением оси  $Ox$  вязкоупругой цилиндрической оболочки, а влияние внешней среды выражается моделью Пастернака. При построении математической модели процесса, происходящего в вязкоупругой цилиндрической оболочке, прогиб трубы предполагается малым по сравнению с ее толщиной и используется гипотеза Кирхгофа-Лява.

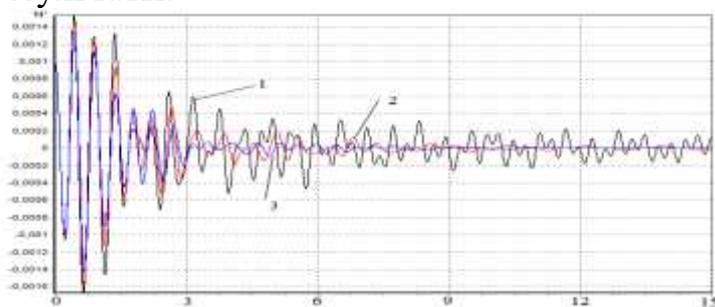
$$(1 - \Gamma^*) \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1 - \mu}{2R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1 + \mu}{2R} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + L_1(w) \right] - \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

$$(1 - \Gamma^*) \left[ \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1 - \mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1 + \mu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + L_2(w) \right] - \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0,$$

$$D(1 - \Gamma^*)\nabla^4 w + L_3(u, v, w) + (1 - \Gamma_1^*) \left( k_1 w - k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q,$$

Для решения данной системы с учетом различных граничных условий выполняется дискретизация по пространственным переменным. В результате система сводится к системе нелинейных обыкновенных интегродифференциальных уравнений относительно времени.

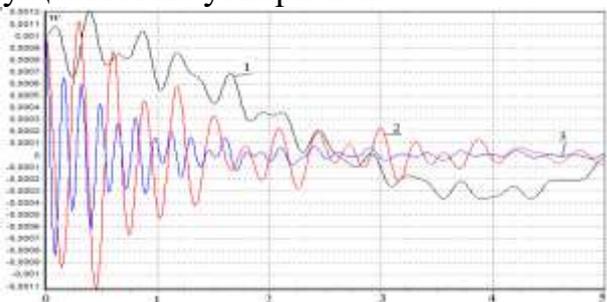
Приведенная система уравнений представляет собой систему интегродифференциальных уравнений, описывающую взаимодействие вязкоупругих труб с вязкоупругим грунтовым основанием. Разработан алгоритм решения данной системы численным методом на основе квадратурных формул. На основе разработанного алгоритма расчета создана программа на компьютерном алгоритмическом языке Delphi и получены следующие результаты.



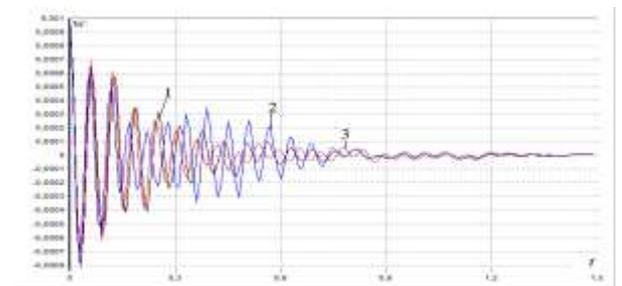
**Рис.3.3.** Изменение во времени смещения ( $w$ ) срединной точки трубы при различных реологических параметрах материала трубы и основания:  $A = 0.0$  (1),  $A = 0.05$  (2),  $A = 0.1$  (3)

На рис.3.3 представлены результаты оценки влияния вязкоупругих свойств материала трубы на характер колебаний системы «труба + основание», моделируемой с использованием двухпараметрической модели основания Пастернака. На графике изображены функции прогиба: по оси ординат отложены значения функции  $w$ , а по оси абсцисс - безразмерный параметр времени.

Из полученных результатов видно, что при моделировании трубы как упругой, затухание нелинейных колебаний сложной системы «труба + основание» происходит сравнительно медленно. Однако при учёте вязкоупругих свойств как трубы, так и основания, процесс затухания существенно ускоряется.



**Рис.3.4.** Изменение смещения ( $w$ ) срединной точки трубы во времени при различных значениях параметров основания ( $k_1$  и  $k_2$ ) в системе (труба + основание)



**Рис.3.5.** Изменение смещения ( $w$ ) срединной точки трубы во времени при различных значениях параметра скорости жидкости внутри трубы ( $M^* = 0.01$  (1),  $0,02$  (2),  $0,03$  (3)) в системе (труба + основание)

На рис.3.4 рассматривается влияние параметров основания на нелинейные колебания трубы, а именно: представлены результаты изменения графика функции смещения  $w(t)$  во времени при различных значениях  $k_1$  и  $k_2$ .

Из анализа полученных результатов видно, что вязкость грунтового основания приводит к более интенсивному затуханию амплитуды колебаний и увеличению частоты колебаний. При значениях  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 3$  (кривая 3) амплитуда колебаний быстро затухает.

На рис.3.5 представлены результаты исследования временной зависимости нелинейных поперечных колебаний трубы при различных значениях отношения скорости течения жидкости внутри трубы  $U_0$  к скорости звука в жидкости  $V_\infty$ . Анализ результатов показывает, что с увеличением скорости жидкости происходит более быстрое затухание амплитуды колебаний трубы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено детальное изучение и анализ научных работ по динамике тонкостенных цилиндрических конструкций, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе.

2. Разработана математическая модель, основанная на теории вязкоупругости Больцмана–Вольтерры и гипотезе Кирхгофа–Лява, для оценки динамики цилиндрической конструкции с протекающей внутри идеальной жидкостью.

3. При решении динамической задачи для вязкоупругой тонкостенной цилиндрической конструкции, описываемой соответствующей математической моделью, с использованием метода Бубнова–Галёркина задача была приведена к системе обыкновенных интегро-дифференциальных уравнений с начальными условиями. Для численного решения данной системы разработан алгоритм, основанный на использовании квадратурных формул.

4. Система алгебраических уравнений, сформированная с использованием квадратурных формул, решена методом Гаусса, и на основе разработанного алгоритма создан пакет прикладных программ на языке программирования Delphi.

5. Динамическое состояние тонкостенной цилиндрической конструкции с внутренним потоком жидкости проанализировано при различных параметрах вязкоупругости, и на основе полученных результатов определены параметры, позволяющие снизить опасную амплитуду колебаний цилиндра.

6. Разработаны математическая модель и расчетный алгоритм для нелинейной задачи динамики вязкоупругих труб с протекающей через неё жидкостью.

7. Разработан метод и расчетный алгоритм для решения системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений задач динамики вязкоупругих цилиндрических оболочек.

8. Исследовано влияние физико-механических параметров на колебания трубы с учетом геометрической нелинейности, показан критерий определения критической скорости течения жидкости и определены критические скорости движения жидкости.

9. Разработаны математическая модель и расчетный алгоритм для нелинейной задачи динамики вязкоупругих труб с протекающей через неё пульсирующей жидкостью.

10. Разработаны математическая модель, метод расчёта и алгоритм для оценки нелинейной динамики сложной системы (труба с основанием) с учётом параметров вязкоупругости её элементов при прохождении через неё пульсирующего потока жидкости, а также создана компьютерная программа для выполнения вычислений.

11. С использованием разработанных математической модели, алгоритма и компьютерной программы исследованы нелинейные колебания сложной системы под действием пульсирующего потока с учётом вязкоупругих свойств системы и параметров самого пульсирующего потока.

На основании полученных результатов выявлены следующие механические эффекты:

- учет вязкоупругих свойств трубы и основания в сложной системе ускоряют процесс затухания нелинейных колебаний;

- чем больше вязкоупругие характеристики системы, тем меньше амплитуда и частота её колебаний, и тем быстрее затухают колебания в трубе;

- чем меньше радиус трубы, тем ниже частота её колебаний и тем медленнее происходит затухание. Увеличение радиуса, напротив, приводит к росту частоты и ускоряет затухание колебаний трубы;

- чем больше скорость жидкости, протекающей внутри трубы, тем быстрее затухает амплитуда колебаний в трубе;

- учет вязкоупругих свойств системы и увеличение жесткости основания вокруг трубы снижает амплитуду колебаний трубы и приводит к более быстрому затуханию колебаний.

**ONE-TIME SCIENTIFIC COUNCIL AT THE NATIONAL RESEARCH  
UNIVERSITY "TIAME" BASED ON THE SCIENTIFIC COUNCIL FOR  
AWARDING ACADEMIC DEGREES DSC.03/26.05.2022.T.10.05**

---

**“TASHKENT INSTITUTE OF IRRIGATION AND AGRICULTURAL  
MECHANIZATION ENGINEERS”  
NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY**

**TURAEV FOZILZHON ZHURAKULOVICH**

**MATHEMATICAL MODELING OF OSCILLATORY PROCESSES IN  
VISCOELASTIC PIPELINES WITH FLOWING LIQUID**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software packages  
01.02.04 - Mechanics of deformable solids

**ABSTRACT**

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

Tashkent - 2025

The topic of the dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2019.2.PhD/T1117.

This dissertation was completed at the National Research University "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers."

The dissertation abstract is available in three languages (Uzbek, Russian, and English (summary)) on the Scientific Council website (<http://tiame.uz>) and on the Ziyonet Information and Educational Portal ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific supervisors:**

**Mirsaidov Mirziyod Mirsaidovich**

Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Technical Sciences, Professor

**Khudayarov Bakhtiyor Alimovich**

doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:**

**Safarov Ismoil Ibrokhimovich**

Doctor of Physics and Mathematics, Professor

**Rakhmonov Zafar Ravshanovich**

Doctor of Physics and Mathematics, Professor

**Leading organization:**

Tashkent State Transport University

The dissertation defense will take place on "31" 10 2025 at 14:00 o'clock at a one-time meeting at the Scientific Council for Awarding Academic Degrees DSc. 03/26.05.2022.T.10.05 at the National Research University - "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" (Address: 100000, Tashkent, Kari Niyazi Street-39. Tel.: (+99871)237-09-75, [admin@tiame.uz](mailto:admin@tiame.uz), [tiame@exat.uz](mailto:tiame@exat.uz)).

The dissertation can be viewed at the Information Resource Center of the National Research University "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" (registered under No. 384). (Address: 100000, Tashkent, Mirzo-Ulugbek district, Kori Niyoziy street, 39, \_\_\_\_\_

The dissertation abstract was sealed out on "18" 10 2025.  
(Mailing protocol No. \_\_\_\_\_ dated "10" 10 2025).



**N. S. Mamatov**

Chairman of the Scientific Council on award of scientific degrees, Doctor of technical Sciences, Professor

**D. K. Bekmurotov**

Scientific secretary of the scientific council for awarding academic degrees, Doctor of philosophy in technical sciences, PhD

**G. U. Zhuraev**

Chairman of the Scientific seminar of the Scientific Council on award of scientific degrees, Doctor of Physics and Mathematics, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The aim of the research work** is to create mathematical models, methods, computational algorithms and computer programs for the analysis of vibration processes of cylindrical shell viscoelastic pipes during fluid flow through them.

**The object of the research work** is the oscillatory processes of cylindrical shell viscoelastic pipes during liquid flow.

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

Development of mathematical models for the linear and nonlinear vibrations of cylindrical viscoelastic shell pipes with fluid flowing through them, taking into account the interaction with the foundation using various (Winkler, Pasternak) models;

Development of discrete models for the vibration problems of cylindrical viscoelastic shell pipes with fluid flowing through them;

Development of computational algorithms that ensure the stability of the computational process in models that take into account the required accuracy of solving vibration problems of cylindrical viscoelastic shell pipes and their specific features in viscoelasticity theory;

Creation of a computer program suite based on algorithms for a class of problems modeling vibration processes in cylindrical viscoelastic shell pipes;

Solution of vibration problems of cylindrical viscoelastic shell pipes with fluid flowing through them and analysis of the obtained results.

**Implementation of the research results.** Mathematical description of the vibration process of viscoelastic cylindrical pipes during fluid flow. Based on the simulation results:

materials on the effect of fluid on the vibration process of a cylindrical water outlet pipeline and the effect of soil on reservoir outlet pipelines were incorporated into the durability and strength calculations for pumping station pipes at the Tirkashev Yusuf farm of the Aksuv Irrigation Systems Department (Ministry of Water Resources Certificate No. NK16184435 dated February 10, 2022). As a result, the time required for engineering calculations to determine pipe strength was reduced by 1.5 times;

A mathematical model, calculation method, and algorithmic program for the vibration process of pipes during the flow of pulsating fluid have been implemented in the calculation of the durability and strength of outlet pipelines at the pumping stations of the Amu-Kashkadarya Basin Administration of Irrigation Systems (Certificate of the Ministry of Water Resources No. NK16184435 dated February 10, 2022). As a result of the study, it was possible to determine the variable flow rate and pressure changes in the pipeline and assess the serviceability of the pipelines occurring at the outlet pipes of the pumping stations;

A mathematical model, calculation method, and algorithmic program for the vibration process of cylindrical pipes during pulsating fluid flow, taking into account the viscoelastic basis, have been implemented at the outlet pipes of the Chimkurgan Reservoir (Certificate of the Ministry of Water Resources No. NK16184435 dated February 10, 2022). As a result, an assessment of the impact of

pulsating flow occurring at the outlet pipes of the Chimkurgan Reservoir was carried out;

Mathematical models of viscoelastic cylindrical pipe vibration processes, calculation algorithms, and developed computer programs have been introduced into the educational process at the National Research University "TIAME" (Act of the Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers on the introduction of research results into the educational process dated November 4, 2019). The result allowed students to obtain solutions to problems on viscoelastic pipes transporting liquids, in numerical values and graphically

**The structure and volume of the dissertation.** The thesis consists of introduction, three chapters, a conclusion and references. The volume of the dissertation is 92 pages.

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

**I bo'lim (I часть, I part)**

1. Тураев Ф.Ж. Моделирование колебаний вязкоупругого трубопровода с протекающей жидкостью // *Irrigatsiya va melioratsiya jurnali* – Toshkent, 2018. - №2(12). – В. 52-56. (05.00.00; №22).

2. Худаяров Б.А, Тураев Ф.Ж, Комилова Х.М. Моделирование вибраций трубопроводов транспортирующих жидкость // *Irrigatsiya va melioratsiya jurnali* – Toshkent, 2018. – Maxsus son – В. 49-55. (05.00.00; №22).

3. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Nonlinear vibrations of fluid transporting pipelines on a viscoelastic foundation // *Magazine of Civil Engineering*. 86(2). Pp.30–45. 2019. (01.00.00; №27). (1) Web of Science.

4. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Mathematical simulation of nonlinear oscillations of viscoelastic pipelines conveying fluid // *Applied Mathematical Modelling*. 2019, Vol. 66, Pp. 662-679. (1) Web of Science.

5. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Mathematical modeling parametric vibrations of the pipeline with pulsating fluid flow // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 614 (1) 012103. 2020. (3) Scopus.

6. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Numerical simulation of a viscoelastic pipeline vibration under pulsating fluid flow // *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. Vol.18 No.2, Pp. 219-237. 2022. (1) Web of Science.

7. Verlan A.A, Khudayarov B.A., Turaev F.Zh., Yuldashev N.N. and Ruzmetov Kh. Effect of non-stationary external forces on vibrations of composite pipelines conveying fluid // *E3S Web of Conferences* **365**, 05014. 2023. (3) Scopus.

**II bo'lim(II часть, II part)**

8. Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. Численное моделирование нелинейных колебаний вязкоупругого трубопровода с жидкостью // *Вестник Томского государственного университета. Серия: Математика и механика.* – Россия, 2016. - №5(43). – С. 91-98.

9. Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. Численное исследование колебания трубопроводов с учетом вязкоупругого основания грунта // *Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование.* – Украина, 2017. №50 (1271). – С. 98-107.

10. Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж., Комилова Х.М. Численное моделирование колебаний трубы с потоком жидкости // *Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование.* – Украина, 2018. №42 (1318). – С. 66-75.

11. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Mathematical model of the pipeline, lying on visco-elastic Pasternak's base // "Amaliy matematika va informatsion texnologiyalarning dolzarb muammolari Al-Xorazmiy 2018" xalqaro tezislar to'plami. 13-15.09.2018 yil. Toshkent, O'zMU. 118-bet.

12. Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. Численное исследование колебаний цилиндрической оболочки на вязкоупругом основании по модели Пастернака // Тезиси XVIII международной научно-технической конференции «Проблемы Информатики и Моделирования» (ПИМ-2018) Харьков-Одесса. 11-15.09.2018 г. С.13.

13. Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. Математическое моделирование вибраций трубопроводов на вязкоупругом основании // "Matematik modellashtirish, algoritmlash va dasturlashning dolzarb muammolari" respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari to'plami. 17-18.09.2018 yil. Toshkent, TATU. 283-288 betlar.

14. Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. Математическое моделирование колебаний трубопроводов с учетом двухпараметрического основания // "Deformasiyalanuvchan qattiq jismlar mexanikasi" mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjuman ma'ruzalari to'plami. 25.10.2018. Toshkent, TIQXMMI. 88-96 betlar.

15. Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. Кучаров О.Р., Комилова Х.М. Компьютерное моделирование колебаний трубопроводов с жидкостью // "Deformasiyalanuvchan qattiq jismlar mexanikasi" mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjuman ma'ruzalari to'plami. 25.10.2018. Toshkent, TIQXMMI. 158-163 betlar.

16. Khudayarov B.A., Turaev F.Zh. Numerical simulation of vibrations of pipe elements with a fluid flow // Proceedings The 6<sup>th</sup> International Arab Conference on Mathematics and Computations. 24-26.04.2019. Zarqa University, Jordan. P.p. 18.

17. Худаяров Б.А., Кучаров О.Р., Тураев Ф.Ж. Yopishqoq grunt asosni hisobga olgan holda, yupqa devorli neft-gaz quvurlarining tebranishini aniqlash dasturi // № DGU 04575 – Toshkent, 13.07.2017 yil.

18. Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. Ikkita o'zgaras koeffisientli asosda yotgan quvurning erkin tebranishini aniqlash dasturi // № DGU 05687 – Toshkent, 27.09.2018 yil.

19. Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж. Математическое моделирование колебательных процессов вязкоупругих трубопроводов с протекающей жидкостью // Monografiya. "TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti Kengashi qarori №5-son. 29.12.2022 yil. Universitet bosmaxonasi. 96 bet.