

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI SAMARQAND DAVLAT
UNIVERSITETI**

QULJANOV JAXONGIR BAXTIYOROVICH

**BIRJINSLIMAS G'OVAK MUHITLARDA SUYUQLIKLARNING
ANOMAL SIZISHI MASALALARI**

01.02.05 – Suyuqlik va gaz mexanikasi

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

Samarqand – 2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Contents of dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD)

Quljanov Jaxongir Baxtiyorovich

Birjinslimas g'ovak muhitlarda suyuqliklarning anomal sizishi masalalari 3

Кулжанов Жахонгир Бахтиёрович

Задачи аномальной фильтрации жидкостей в неоднородных пористых средах 21

Kuljanov Jakhongir Bakhtiyorovich

Problems of anomalous filtration of fluids in inhomogeneous porous media 39

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ

List of published works 43

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJA BERUVCHI
DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**SHAROF RASHIDOV NOMIDAGI
SAMARQAND DAVLAT UNIVERSITETI**

QULJANOV JAXONGIR BAXTIYOROVICH

**BIRJINSLIMAS G‘OVAK MUHITLARDA SUYUQLIKLARNING
ANOMAL SIZISHI MASALALARI**

01.02.05 – Suyuqlik va gaz mexanikasi

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

Samarqand–2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.4.PhD/FM799 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.samdu.uz) va "Ziyonet" axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: **Maxmudov Jamol Maxmud o'g'li**
fizika-matematika fanlari doktori

Rasmiy opponentlar: **Burnashev Vladimir Fidratovich**
fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

Xudaykulov Savet Ishonkulovich
texnika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot: **O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi**
M.T.O'razboyev nomidagi Mexanika va inshootlar
seysmik mustahkamligi instituti

Dissertatsiya himoyasi Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti huzuridagi DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 raqamli Ilmiy kengashning «__» _____ 2024 yil soat __ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 140104, Samarqand sh., Universitet xiyoboni, 15-uy. Tel.: (+99866) 239-11-40, faks: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: devonxona@samdu.uz).

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

Dissertatsiya avtoreferati 2024 yil «__» _____ kuni tarqatildi.
(2024 yil «__» _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi).

R.I.Xalmuradov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
texnika fanlari doktori, professor

O'A.Nishonov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash ilmiy kotibi,
fizika-matematika fanlari
bo'yicha falsafa doktori (PhD)

B.X.Xo'jayorov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi,
fizika-matematika fanlari doktori, professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda 30% ga yaqin insonlar suv tanqisligi muammosiga duch kelmoqda hamda sanoat, qishloq xo‘jaligi va aholini toza ichimlik suvi bilan ta‘minlash masalalariga katta e‘tibor qaratilmoqda. BMT ma‘lumotlariga asosan “Yer osti suvlari dunyo aholisi tomonidan maishiy ehtiyojlar uchun olinadigan suv hajmining 50% va sug‘orish uchun ishlatiladigan barcha suvning taxminan 25% ni ta‘minlaydi. Kelgusi 30 yil ichida global suv iste‘moli yiliga taxminan 1% ga oshadi. Dunyoning ayrim mintaqalarida tobora kuchayib borayotgan suv tanqisligi yer osti suvlaridan foydalanishga yanada mas‘uliyatli va oqilona yondashishni talab qilmoqda”¹. Shu jihatdan, ko‘pgina xorijiy davlatlar, jumladan AQSh, Xitoy, Rossiya Federatsiyasi va boshqa rivojlangan mamlakatlarda yer osti suvlari ifloslanishining oldini olishda, ichimlik va oqova suvlarni tozalashda, neft konlarini ikkilamchi va uchlamchi usulda ekspluatatsiya qilishni bashorat va tahlil qilishda, birjinslimas g‘ovak muhitlarda birjinslimas suyuqliklar sizishining adekvat matematik modellarini amaliyotga joriy etishni taqozo etadi. Bu borada kasr tartibli differensial tenglamalar apparati murakkab geometriyaga ega fizik-mexanik jarayonlarni matematik modellashtirish uchun ishlatilmoqda. Xususan fraktal tuzilishga ega bo‘lgan g‘ovak muhitlarda suspenziyalarning anomal sizishi jarayonlarini ifodalashda kasr tartibli differensial tenglamalar asosida ishlab chiqilgan matematik modellarini yaratish va tadqiq etishga alohida e‘tibor qaratilmoqda.

Jahonda, bugungi kunda, fraktal tuzilishga ega bo‘lgan g‘ovak muhitda bir jinsli bo‘lmagan suyuqliklar anomal sizishi jarayonini tahlil qilishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar jadal olib borilmoqda. Bu yo‘nalishda, g‘ovak muhitlarda suyuqlik va gazlarning sizish jarayonlarining matematik modellarini qurish va uni sonli tadqiq qilish bo‘yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Shu bilan birga, kasr tartibli differensial tenglamalar asosida g‘ovak muhitda suyuqlik va gazlarni anomal sizishi jarayonlarining matematik modellarini takomillashtirish, hamda ularga mos masalalarni yechish uchun samarali hisoblash algoritmlari va dasturlarini ishlab chiqishga alohida e‘tibor berilmoqda.

Respublikamizda bir jinsli bo‘lmagan g‘ovak muhitlarda bir jinsli bo‘lmagan suyuqliklar sizishi va modda ko‘chishi bilan bog‘liq bo‘lgan murakkab gidrodinamik jarayonlarni matematik modellashtirish, sonli modellar va algoritmlarni yaratish hamda amaliyotga tatbiq etish chora-tadbirlarini ishlab chiqishga alohida e‘tibor qaratilmoqda. 2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan “Respublika aholisining ichimlik suvi bilan ta‘minlanganlik darajasini 87 foizga yetkazish, 32 ta yirik shaharlar va 155 ta tuman markazlarida oqova suv tizimlarini yangilash...”² bo‘yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, chiqindilarni suv va ichimlik suvini tozalash jarayonlarini

¹Birlashgan Millatlar Tashkilotining dunyo miqyosidagi suv resurslari holati to‘g‘risidagi ma‘ruzasi, 2022 y. https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/un_world_water_dev_report_2022.pdf

²O‘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

modellash, ikkilamchi va uchlamchi usullar bilan neft va gaz rezervuarlariga ta'sir qilish, jarayonlarning matematik modellarini takomillashtirish, hisoblash tajribalarini o'tkazish imkoniyatini beruvchi samarali algoritm va dasturiy ta'minotini yaratish muhim vazifalardan biridir.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024-yil 7-maydagi PF-74-son "Suv xo'jaligida zamonaviy boshqaruv tizimini joriy qilish va rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlarini belgilash to'g'risida" Farmoni, 2022-yil 24-maydagi PQ-257-son "Aholining ichimlik suv ta'minoti va oqova suv xizmatlari bilan ta'minlanganlik darajasini oshirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida", 2018-yil 2-iyuldagi PQ-3823-son "Suv resurslaridan foydalanish samaradorligini oshirish chora-tadbirlari to'g'risida", 2017-yil 30-iyundagi PQ-3107-son "Neft-gaz tarmog'ini boshqarish tizimini takomillashtirishga oid chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa meyoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

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

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Oxirgi yillarda bir jinsli bo'lmagan muhitlarda suspenziyaning anomal sızishining matematik modellarini yaratish va takomillashtirish hamda ularni sonli tadqiq qilish quyidagi olimlar: P.M. Adler, A.E. Malevich, V.V.Mityushev, J.Kim, J.Lee, K.C.Lee, J.Bear, M.Caputo, F.Wang, G.Brown, R.Raghavan, C.Coats, K.H.Smith, I.Hashimoto, N.W.Haws, E.L.Cussler, M.M.Rahman, A.S.Fomin, V.A.Chugunov, T.Hashida, A.D.Benson, F.Huang, F.Liu, J.Birkholzer, R.Schumer, N.R.Horne, H.Zhan, B.F.A.Tompson, A.X.Mirzadzhanzade, R.I.Nigmatulin N.C.Belevsov va boshqalarning ishlarida qaralgan.

O'zbekistonda g'ovak muhitlarda suyuqlik va gaz sızishi jarayonlarini boshqarish, bashorat va tadqiq qilish uchun gidrodinamik modellar va hisoblash usullarini ishlab chiqishga yurtimiz olimlaridan Dj.F.Fayzullayev, F.B.Abutaliyev, E.B.Abutaliyev, R.Sadullayev, N.M.Muxidinov, I.Alimov, B.X.Xo'jayorov, J.Akilov, I.K.Xujayev, N.Ravshanov, S.E.Xudaykulov, Sh.Kayumov, Z.M.Malikov, V.F.Burnashev va boshqalar salmoqli hissa qo'shgan.

Shuni ta'kidlash kerakki, g'ovak muhitda anomal sızishning bir qator mavjud modellari jarayonning muhim xususiyatlarini ifodalaydi. Kasr tartibli differentsial tenglamalar apparati fraktal tuzilishga ega muhitda anomal modda ko'chishi va sızishi jarayonini ifodalash uchun endi qo'llanila boshlandi. Bunday matematik modellar asosida fraktal tuzilishga ega bo'lgan g'ovak muhitda anomal sızish masalalari yetarlicha o'rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining ilmiy tadqiqot ishlari rejasining №19.12 «Muhandislik va tabiiy jarayonlarning matematik modellarini tuzish va sonli tadqiq qilish» (2000-2018) hamda №OT-F4-

64 «Bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitlarda moddalarning ko'chishi va suyuqliklarning sizishi gidrodinamik modellarini tuzish va sonli tadqiq etish» (2017-2020) mavzusidagi fundamental grant doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi anomal Darsi qonuni va anomal Fik qonuni asosida fraktal tuzilishga ega bo'lgan bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitda suspenziyalarning anomal ko'chishi va sizishi matematik modellarini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifasi

anomal Darsi qonuni asosida bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitda suspenziyalarning sizish jarayonlarining matematik modellarini takomillashtirish;

ikki zonali g'ovak muhitlarda suspenziya sizish va ko'chishi jarayonlarini matematik modellarni takomillashtirish hamda hisoblash algoritmlarini ishlab chiqish;

sizish tezligi maydonining bir jinsli bo'lmaganligini hisobga olgan holda suyuqliklarni bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitda sizishi va modda ko'chishi masalalarini qo'yish va sonli yechish;

anomal Darsi qonuni asosida g'ovak muhitdagi dispers suyuqlikni harakatdagi va kam harakatdagi suyuqlik bilan kolmatatsion-suffozion sizishning matematik modelini takomillashtirish;

Tadqiqot ob'ekti fraktal tuzilishga ega bo'lgan bir va ikki zonali g'ovak muhitdir.

Tadqiqotning predmeti matematik va gidrodinamik modellar, fraktal tuzilishga ega bo'lgan g'ovak muhitda dispers suyuqliklarning anomal sizishi va ko'chishi jarayonlarini gidrodinamik tahlil qilish va hisoblash algoritmlari tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida mexanikani saqlashning fundamental qonuniyatlari, anomal Darsi va Fik qonunlari, sizish nazariyasining asosiy tenglamalari, matematik va sonli modellashtirish usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

birjinslimas g'ovak muhitlarda suspenziyalarning sizishi jarayonining matematik modeli sizish jarayoni anomalliligi va g'ovak muhitning fraktal tuzilishga ega ekanligini hisobga olgan holda takomillashtirilgan va masalalarni bir va ikki o'lchamli hollarda chekli ayirmalar usuli bilan yechish uchun hisoblash algoritmi ishlab chiqilgan;

ikki zonali g'ovak muhitda suspenziyalarni sizishi va ko'chishi jarayonining matematik modeli kasr tartibli Darsi va Fik qonunlarini, sizish jarayonida retordatsiya omilini hisobga olib takomillashtirilgan hamda kasr hosila tartibining sizish xarakteristikalariga ta'siri baholangan;

birjinslimas g'ovak muhitlarda sizish jarayonining anomal bo'lganligini hisobga olgan holda bosim o'tkazuvchanlik tenglamasi takomillashtirilgan hamda kasr hosila tartibining turli qiymatlarida ikki zonali muhitlar umumiy chegarasidan o'tuvchi joriy, umumiy va jamlanma nisbiy modda oqimi aniqlangan;

ikki zonali g'ovak muhitda bir jinsli bo'lmagan suyuqliklar sizishining matematik modeli g'ovak kolmatatsiyasi va suffoziyasini hisobga olib

takomillashtirilgan va masalalarni yechish uchun hisoblash algoritmi ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijasi quyidagilardan iborat:

fraktal tuzilishga ega bo'lgan bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitda suspenziyalarning anomal sizishining hisoblash algoritmi ishlab chiqilgan;

fraktal tuzilishga ega bo'lgan g'ovak muhitda suspenziyalarni sizishi masalasini sonli yechishning samarali algoritmi ishlab chiqilgan;

g'ovak muhitda bir jinsli bo'lmagan suyuqliklarni anomal sizishi masalasi uchun dasturiy ta'minot ishlab chiqilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchligi. Moddani anomal ko'chishi va sizishi uchun tenglamalarni tuzishda tutash muhitlar mexanikasining asosiy tamoyillari - massa saqlanish qonunlari, anomal Darsi va Fik qonunlari ishlatilgan. Masalalarni sonli yechishda ularning turg'unligi tekshirildi. Sonli natijalar asosida fizik tahlil va ularning haqiqiy gidrodinamik jarayonlarga muvofiqligini baholash amalga oshirildi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati bir jinsli bo'lmagan muhitda suyuqliklarning anomal sizishi modellarini takomillashtirishdan iborat. Bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitlarda suyuqliklarning anomal sizishi nazariyasiga ishlab chiqilgan modellar va algoritmlar muayyan hissa qo'shish bilan izohlanadi.

Dissertatsiya ishining amaliy ahamiyati, olingan natijalardan neft va gaz qazib olish jarayonlarini uchlamchi usullar yordamida ishlov berishda, oqava suvlar va ichimlik suvlarini tozalash jarayonlarini sifat va miqdor jihatdan tahlil qilishda, gedralogiyada foydalaniladi, hamda g'ovak muhitlarda suspenziyalar sizishi va modda ko'chishi jarayonlarini metodologik yondashuvni ishlab chiqish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Fraktal tuzilishga ega g'ovak muhitlarda bir jinsli bo'lmagan suyuqliklarni anomal sizishi jarayonlarining takomillashtirilgan modellarini sonli tadqiq etish uchun ishlab chiqilgan hisoblash algoritmlari va dasturiy vositalari asosida:

diffuziya va konveksiya hodisalari asosida birjinslimas g'ovak muhitlarda suyuqliklarning anomal sizishi jarayonining takomillashgan matematik modellari, ishlab chiqilgan hisoblash algoritmi va g'ovak muhitda dispers sistemalarning harakatlanuvchi va kam harakatdagi suyuqliklari bo'lgan ikki zonadan tashkil topgan kolmatatsion-suffozion anomal sizishi modellarini sonli tahlil qilish dasturlaridan Jizzax viloyati Sirdaryo-Zarafshon irrigatsiya tizimlari havza boshqarmasi tamonidan suv omborini suv bilan to'ldirish jarayonida suv bilan birga oqib kirgan turli xil zararli moddalarning tarqalish maydonini baholash hamda muhandislik hisoblarni o'tkazishga ketadigan vaqt va mehnat sarfini qisqartirish maqsadida foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligining 2023 yil 16 avgustdagi 03/37-2604-sonli guvohnomasi).

Suv omborida loyqaning to'g'on va ombor tubiga o'tirib qolishi jarayoni baholangan hamda suv omboriga oqib kirgan turli mexanik zarralarning tarqalish maydonini aniqlash muhandislik ishlari aniqligini 7-8 % ga oshirish imkonini bergan;

Sugʻorish masalalarida qatlamlarning fraktal tuzilishga ega ekanligini hisobga olib sizish masalasini sonli yechish algoritmi va dasturi asosida suspenziyalarning koʻchishi jarayonida kolmatatsion-suffozion hodisalarning roli baholandi. Bu muhandislik hisoblarini oʻtkazishga ketadigan vaqt va mehnat sarfini qisqartirish imkoniyatini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 7 ta xalqaro va 4 ta respublika anjumanlarida muhokamadan oʻtgan.

Tadqiqot natijalarining eʼlon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi boʻyicha 18 ta ilmiy ish nashr etilgan boʻlib, shulardan 7 tasi dissertatsiya ishlari natijalarini nashr etish uchun Oʻzbekiston Respublikasi Oliy taʼlim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy Attestatsiya tomonidan tavsiya etilgan ilmiy nashrlar roʻyxatiga kiritilgan, shu jumladan, 4 tasi xorijiy nashrlarda va 3 tasi respublika ilmiy jurnallarida chop etilgan hamda EHM uchun dastur guvohnomasi (№ DGU 21966) olingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish qismi, toʻrtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar roʻyxatidan tashkil topgan. Dissertatsiyaning hajmi 109 betni tashkil etadi.

DISSERTASINING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yoʻnalishlariga mosligi koʻrsatilgan, dissertatsiya mavzusi va muammoning oʻrganilganlik darajasi boʻyicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar haqida umumiy maʼlumot

keltirilgan, tadqiqot maqsadi, vazifalari, obyekti va predmeti tavsiflangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi boʻyicha maʼlumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Gʻovak muhitlarda suyuqliklarning anomal sizishi**» deb nomlanuvchi birinchi bobida bir jinsli boʻlmagan gʻovak muhitlarda moddalarning anomal koʻchishi jarayonlarini modellashtirish muammolarining tahlili oʻtkazilgan. Diffuziya yondashuvi asosida moddaning anomal koʻchishi koʻrib chiqilgan va adsorbsiya hodisalarining taʼsiri tahlil qilingan. Bir jinsli boʻlmagan gʻovakli muhitda moddalarni anomal koʻchish masalalarini sonli yechish usullari tahlil qilingan.

1.1-paragrafda bir jinsli boʻlmagan muhitlarda suyuqliklarning anomal sizishi haqida maʼlumotlar keltirilgan. Asosiy adabiyotlar asosida umumiy maʼlumotlar keltirilgan.

1.2-paragrafda gʻovak muhitda suyuqliklarning anomal sizishi jarayonlarining matematik modelining umumiy koʻrinishi keltirilgan. Fraktal tuzilishga ega muhitlarda jarayonni modellashtirishda kasr tartibli differensial tenglamalardan keng foydalanilgan.

1.3-paragrafda gʻovak muhitda anomal sizish moddellarini sonli tadqiq qilish usullari keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**G'ovak muhitlarda suspenziyalarning anomal sizishi masalalari**» deb nomlanuvchi ikkinchi bobida kasr Darsi qonuni asosida fraktal tuzilishga ega bo'lgan muhitda suspenziyani anomal sizishi masalasi qo'yildi va sonli yechildi.

2.1-paragrafda g'ovak muhitlarda suspenziyalarning anomal sizishi jarayonini matematik modellari takomillashtirildi va unga mos anomal sizishi masalasi sonli yechildi. Anomal Darsi qonuniga asoslangan kasr tartibli differensial tenglamalari uchun bosim o'tkazuvchanlik tenglamasi taklif qilingan. Muallaq zarrachalar konsentratsiyasi, bosim va sizish tezligidagi o'zgarishlar profillari aniqlandi. Ko'chish va sizish xususiyatlari baholandi.

Dastlab, muhit bir jinsli suyuqlik bilan to'ldirilgan deb qaralgan. Anomal ta'sirlarni hisobga olgan holda suspenziyaning konvektiv-diffuzion ko'chish tenglamasini quyidagicha tasvirlash mumkin

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^\beta c}{\partial x^\beta} - \frac{\partial(vc)}{\partial x}, \quad (1)$$

bu yerda c – suyuqlikdagi muallaq zarrachalar konsentratsiyasi, v – sizish tezligi, D – diffuziya koeffitsiyenti, β – hosila tartibi, t – vaqt, x – koordinata.

Darsi qonuniga asoslangan anomal sizish tezligi quyidagicha aniqlanadi

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial^\gamma p}{\partial x^\gamma}, \quad (2)$$

bu yerda p – bosim, μ – suspenziyaning qovushoqlik koeffitsiyenti, k – o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti va γ – hosila tartibi.

Siqiladigan suyuqlik oqimining g'ovakli muhit orqali tutashlilik tenglamasini quyidagicha yozish mumkin

$$\frac{\partial(\rho m)}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho} v) = 0, \quad (3)$$

bu yerda m – g'ovaklik koeffitsiyenti, ρ – suyuqlikning zichligi.

Biz elastik suyuqlik va elastik g'ovak muhitning holat tenglamalaridan foydalanamiz

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta_{sc} (p - p_0)), \quad m = m_0 + \beta_c (p - p_0), \quad (4)$$

bu yerda β_{sc} – suyuqlikning xajmiy siqiluvchanlik koeffitsiyenti, β_c – muhitning siqiluvchanlik koeffitsiyenti, ρ_0 – suyuqlikning boshlang'ich zichligi, p_0 – boshlang'ich bosim.

(2) va (4) ni (3) ga qo'yib, kasr hosilali pyezoo'tkazuvchanlik tenglamasini olish mumkin.

Pyezoo'tkazuvchanlik tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \frac{\partial^{\gamma+1} p}{\partial x^{\gamma+1}}, \quad (5)$$

bu yerda $\chi = \frac{k}{\mu \beta^*}$ – pyezoo'tkazuvchanlik koeffitsiyenti va β^* – muhitning elastik sig'imi koeffitsiyenti.

Boshlang'ich va chegaraviy shartlar quyidagicha:

$$c(0, x) = 0, \quad (6)$$

$$c(t, 0) = c_0, \quad c_0 = \text{const}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x}(t, l) = 0, \quad (8)$$

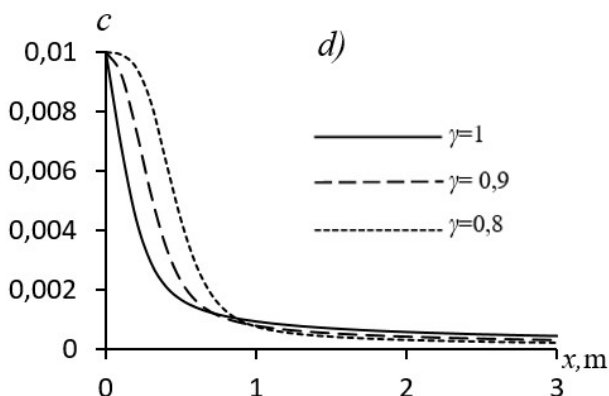
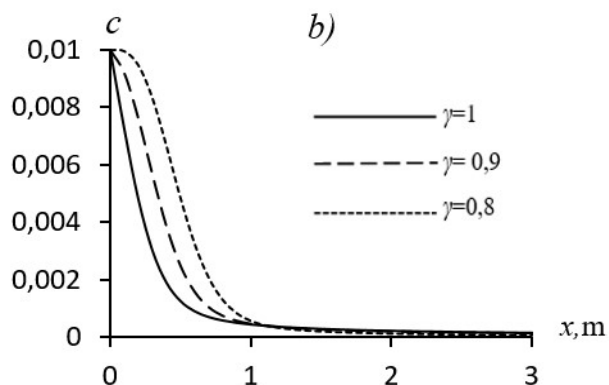
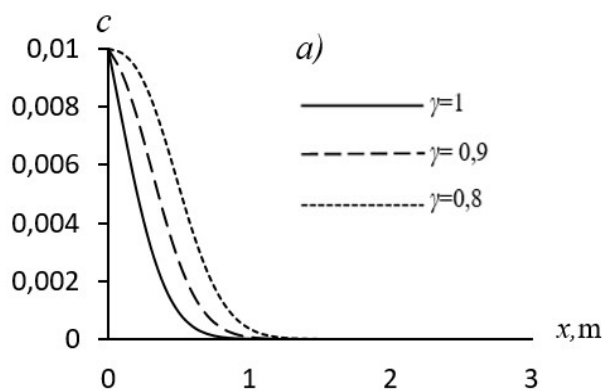
$$p(0, x) = p_0, \quad p_0 = \text{const}, \quad (9)$$

$$p(t, 0) = p_c, \quad p_c > p_0, \quad p_c = \text{const}, \quad (10)$$

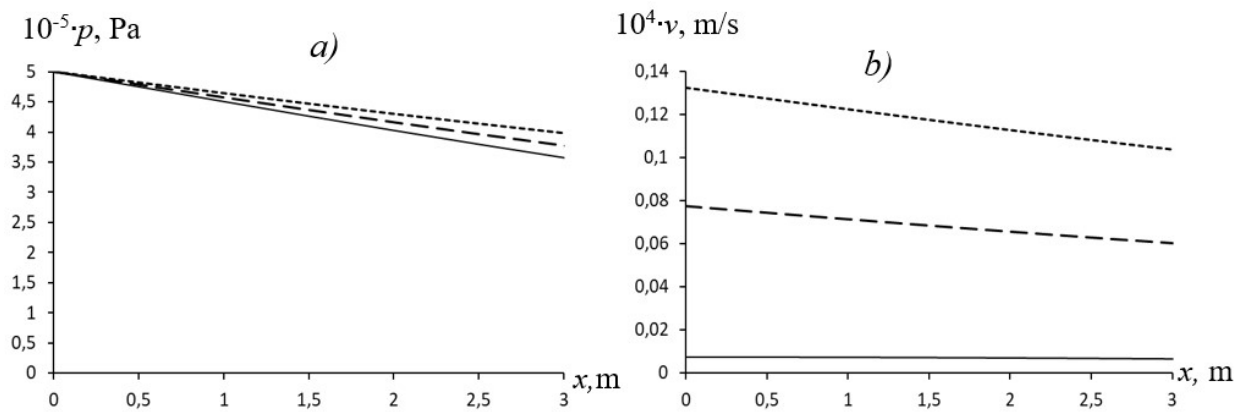
$$\frac{\partial p}{\partial x}(t, l) = 0. \quad (11)$$

(1), (2), (5) tenglamalar (6) – (11) boshlang‘ich va chegaraviy shartlar bilan birgalikda chekli ayirmalar usuli yordamida yechilgan. Parametrlarning quyidagi qiymatlarida hisoblash tajribalariri o‘tkazilgan: $k = 10^{-13} \text{ m}^{1+\gamma}$, $\mu = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\beta^* = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$, $p_c = 5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$, $c_0 = 0,01$ va $D = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^\beta/\text{s}$.

Ba‘zi bir natijalar 1-2 rasmlarda keltirilgan. Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, γ qiymatining 1 dan kamayishi anomal sizish va diffuziya jarayonining ta‘sirining kuchayishiga olib keladi. Bundan γ va β larni mos ravishda 1 va 2 dan kichik qiymatlarni qabul qilganda x yo‘nalishida diffuziya effektlarining kuchayganini ko‘rish mumkin (1-rasm). 2- rasmda esa γ ni 1 dan kamayishi mos ravishda bosim va sizish tezligining oshishganligini ko‘rishimiz mo‘mkin.



1-rasm. Konsentratsiyaning o‘zgarish profillari, bunda $\beta=2$ (a), $\beta=1,8$ (b), $\beta=1,6$ (d). $t=3600 \text{ s}$



2-rasm. p (a) va v (b) larning o'zgarish profillarida, bunda — $\gamma=1$, --- $\gamma=0,9$, $\gamma=0,8$, $\beta=2$, $t=3600$ s

2.2- paragrafda 2.1- paragrafdagi masaladan farqli o'laroq, ikki o'lchovli konvektiv-diffuzion masalasi ko'rib chiqilgan. Masalani o'rganish sohasi $R\{0 \leq x < \infty, 0 \leq y \leq h\}$ dan iborat bo'lsin. R sohaning yuqori va pastki chegaralari suyuqlik va zarachalarni o'tkazmaydi deb faraz qilinadi. R sohada suyuqlik x va y yo'nalishlar bo'yicha harakatlanadi. Muhitning fraktalligini hisobga olgan holda balans tenglamasi, anomal Darsi qonuni va pyezoo'tkazuvchanlik tenglamasi quyidagicha tasvirlash mumkin

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} &= D_x \frac{\partial^{\beta_1} c}{\partial x^{\beta_1}} + D_y \frac{\partial^{\beta_2} c}{\partial y^{\beta_2}} - \frac{\partial(v_x c)}{\partial x} - \frac{\partial(v_y c)}{\partial y}, \\ v_x &= -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial^{\gamma_1} p}{\partial x^{\gamma_1}}, \quad v_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial^{\gamma_2} p}{\partial y^{\gamma_2}}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= \chi_x \frac{\partial^{\gamma_1+1} p}{\partial x^{\gamma_1+1}} + \chi_y \frac{\partial^{\gamma_2+1} p}{\partial y^{\gamma_2+1}}, \end{aligned} \quad (12)$$

bu yerda $\gamma_1, \gamma_2, \beta_1, \beta_2$ – hosila tartiblari.

Hisoblash natijalari shuni ko'rsatadiki, sizish tezligi tenglamasida hosila tartibining 1 dan kamayishi bosim va sizish tezligining oshishiga olib keladi. Diffuziya hadidagi hosila tartibining 2 dan kamayishi diffuziya jarayonining "tezlashishiga" olib keladi.

G'ovak muhitda suspenziyalarni sizishida qattiq muallaq zarralarning bir qismi g'ovak bo'shlig'iga o'tirib qolishi mumkin. 2.3-paragrafda fraktal tuzilishga ega bo'lgan ikki o'lchovli muhitda sizish masalasi retardatsiya faktorini hisobga olgan holda qaralgan.

Retardatsiya faktorini hisobga olgan holda balans tenglamasi quyidagi ko'rinishida bo'ladi

$$\frac{\partial c}{\partial t} + a \frac{\partial^\delta c}{\partial t^\delta} = D_x \frac{\partial^{\beta_1} c}{\partial x^{\beta_1}} + D_y \frac{\partial^{\beta_2} c}{\partial y^{\beta_2}} - \frac{\partial(v_x c)}{\partial x} - \frac{\partial(v_y c)}{\partial y}, \quad (13)$$

bu yerda a – retardatsiya faktori, δ – hosila tartibi.

Sizish tezligi komponentlari quyidagicha aniqlanadi

$$v_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad v_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y}. \quad (14)$$

Bosim uchun pyezoo'tkazuvchanlik tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \chi_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}. \quad (15)$$

Shunday qilib, biz balans tenglamasi (13), Darsi qonuni (14) va pyezoo'tkazuvchanlik tenglamasidan (15) iborat bo'lgan supenziyalar ko'chishi tenglamalari sistemasini olamiz.

Boshlang'ich va chegaraviy shartlar quyidagicha:

$$c(0, x, y) = 0, \quad (16)$$

$$c(t, 0, y) = c_0, c_0 = \text{const}, y = h/2, \quad (17)$$

$$\frac{\partial c}{\partial y}(t, x, 0) = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (18)$$

$$\frac{\partial c}{\partial y}(t, x, h) = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (19)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x}(t, 0, y) = 0, y \in [0; h/2) \cup (h/2; h], \quad (20)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x}(t, \infty, y) = 0, \quad 0 \leq y \leq h, \quad (21)$$

$$p(0, x, y) = p_0, \quad p_0 = \text{const}, \quad (22)$$

$$p(t, 0, y) = p_c, p_c > p_0, p_c = \text{const}, y = h/2, \quad (23)$$

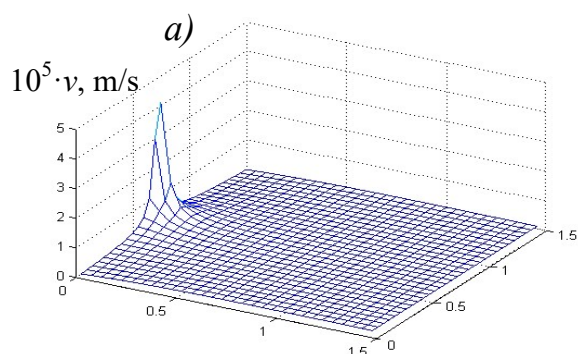
$$\frac{\partial p}{\partial y}(t, x, 0) = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (24)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y}(t, x, h) = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (25)$$

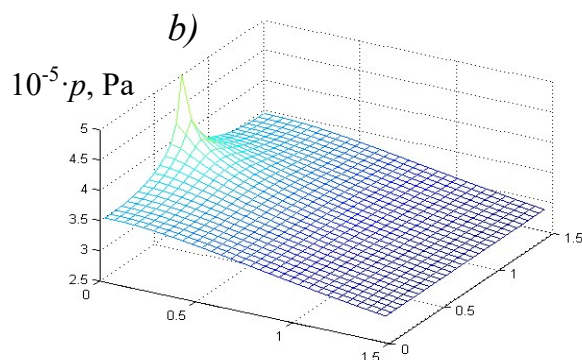
$$\frac{\partial p}{\partial x}(t, 0, y) = 0, y \in [0; h/2) \cup (h/2; h], \quad (26)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}(t, \infty, y) = 0, \quad 0 \leq y \leq h. \quad (27)$$

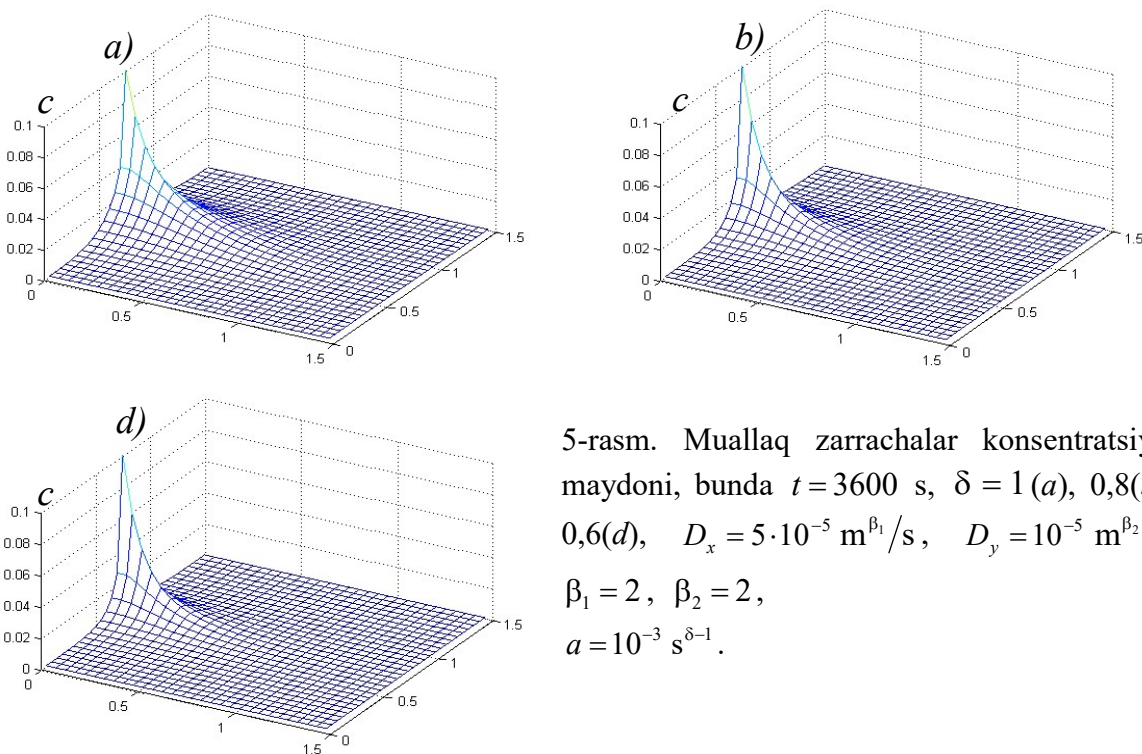
(13) – (15) sistemalar (16) – (27) boshlang'ich va chegaraviy shartlar bilan birgalikda chekli ayirmalar usuli yordamida yechilgan.



3-rasm. Sizish tezligi maydoni, bunda $t = 3600$ s.



4-rasm. Bosim maydoni, bunda $t = 3600$ s.



5-rasm. Muallaq zarrachalar konsentratsiyasi maydoni, bunda $t = 3600$ s, $\delta = 1$ (a), $0,8$ (b), $0,6$ (d), $D_x = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{\beta_1}/\text{s}$, $D_y = 10^{-5} \text{ m}^{\beta_2}/\text{s}$, $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 2$, $a = 10^{-3} \text{ s}^{\delta-1}$.

3-4-rasmdan ko‘rinib turibdiki, suyuqlik etkazib berish nuqtasidan boshlab, suyuqlik harakati zonasi va mos keladigan bosim maydoni hosil bo‘ladi. Konsentratsiya maydoni turli qiymatlar uchun 5-rasmda ko‘rsatilgan. Bunda hosila tartibi δ ning 1 dan kamayishi bilan konsentratsiya maydonining tarqalishi sekinlashadi.

Dissertatsiyaning «**Fraktal strukturali ikki zonali bir jinsli bo‘lmagan muhitlarda anomal sızish masalalari**» deb ataluvchi uchunchi bobida fraktal tuzilishga ega bo‘lgan ikki zonali g‘ovak muhitlarda modda ko‘chishi va sızishi masalasi qo‘yildi va sonli yechildi.

3.1 - paragrafda fraktal strukturali ikki zonali g‘ovak muhitlarda modda ko‘chishi masalasi qaraldi. Masalaning o‘rganish sohasi $R^+ \{0 \leq x < \infty, 0 \leq y \leq h\}$ va $R^- \{0 \leq x < \infty, -\infty < y \leq 0\}$ sohalardan tashkil topgan (6-rasm). R^+ – suyuqlikning harakatdagi hamda R^- – harakatsiz soha deb qaraladi. $t > 0$ dan boshlab R^+ ning chap chegarasining markazidan, ya’ni $x = 0$, $y = h/2$ dan muallaq qattiq zarrachali c_0 konsentratsiyali suyuqlik haydaladi, ya’ni

$$c = \begin{cases} c_0, & x = 0, \quad y = h/2, \\ 0, & x = 0, \quad y \neq h/2. \end{cases} \quad (28)$$

Shunday qilib, R^+ da bo‘ylama va ko‘ndalang diffuziya bilan birgalikda qattiq zarrachaning konvektiv ko‘chishi sodir bo‘ladi (13).

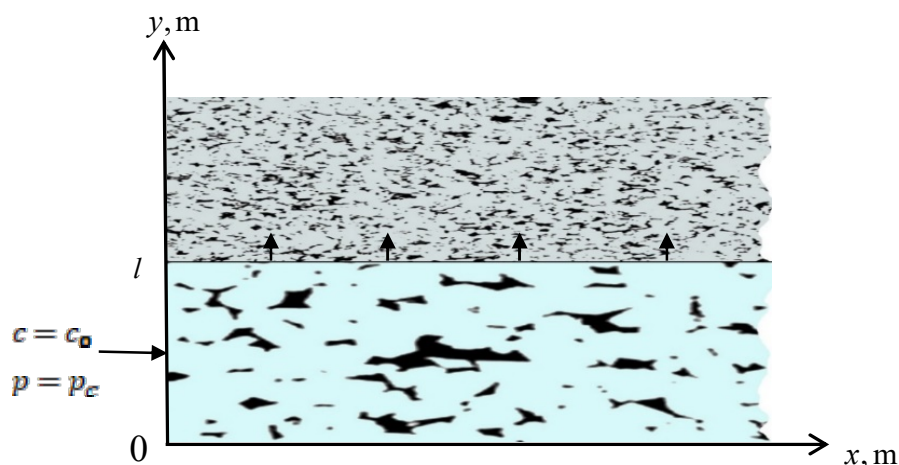
R^- da faqat bo‘ylama yo‘nalish bo‘yicha moddaning diffuzion ko‘chishi sodir bo‘ladi. Shuni aytish mumkinki, R^- da R^+ dan farqli ravishda bo‘ylama yo‘nalish 0 dan $-y$ ga yo‘nalgan deb hisoblanadi.

R^- da modda ko‘chishi jarayoni quydagicha bo‘ladi

$$\frac{\partial c}{\partial t} + a_3 \frac{\partial^{\gamma_3} c}{\partial t^{\gamma_3}} = D_3 \frac{\partial^{\beta_3} c}{\partial y^{\beta_3}}, \quad (x, y) \in R^-, \quad (29)$$

bu yerda D_3 – effektiv diffuziya koeffitsenti, a_3 – retardatsiya faktori, γ_3, β_3 – hosila tartibi.

R^+ da aralashma harakati jarayoni (14) umumlashgan Darsi qonuniga bo‘ysinadi. Pyezoo‘tkazuvchanlik tenglamasi (15) ko‘rinishda bo‘ladi.



6-rasm. Ikki zonali muhitda suspenziyalar ko‘chishi va sizishi sxemasi

R^+ va R^- zonalarning umumiy chegarasida massa oqimi sodir bo‘ladi. R^+ da $x \rightarrow \infty$ da va R^- da $y \rightarrow -\infty$ bo‘lganda modda oqimi bo‘lmaydi deb qaraymiz. Masalani tadqiq etish bosqichida bu shartlar R^+ da $x = \infty$ ga va R^- da $y = -\infty$ ga konsentratsiya profillari yetib bormaydi yoki cheksiz chegara yopiqligiga mos keladi.

Masalalar yechishda chekli ayimlar usulidan foydalanildi. Hisoblash natijalari ko‘rsatadiki, diffuzion ko‘chish hadidagi hosila tartibi 2 dan kamayishi konsentratsiya maydonining tarqalishiga sezilarli ta‘sir qiladi. Konsentratsiyaning vaqt bo‘yicha hosila tartibi 1 dan kamayishi diffuziya jarayonining kamayishiga olib keladi.

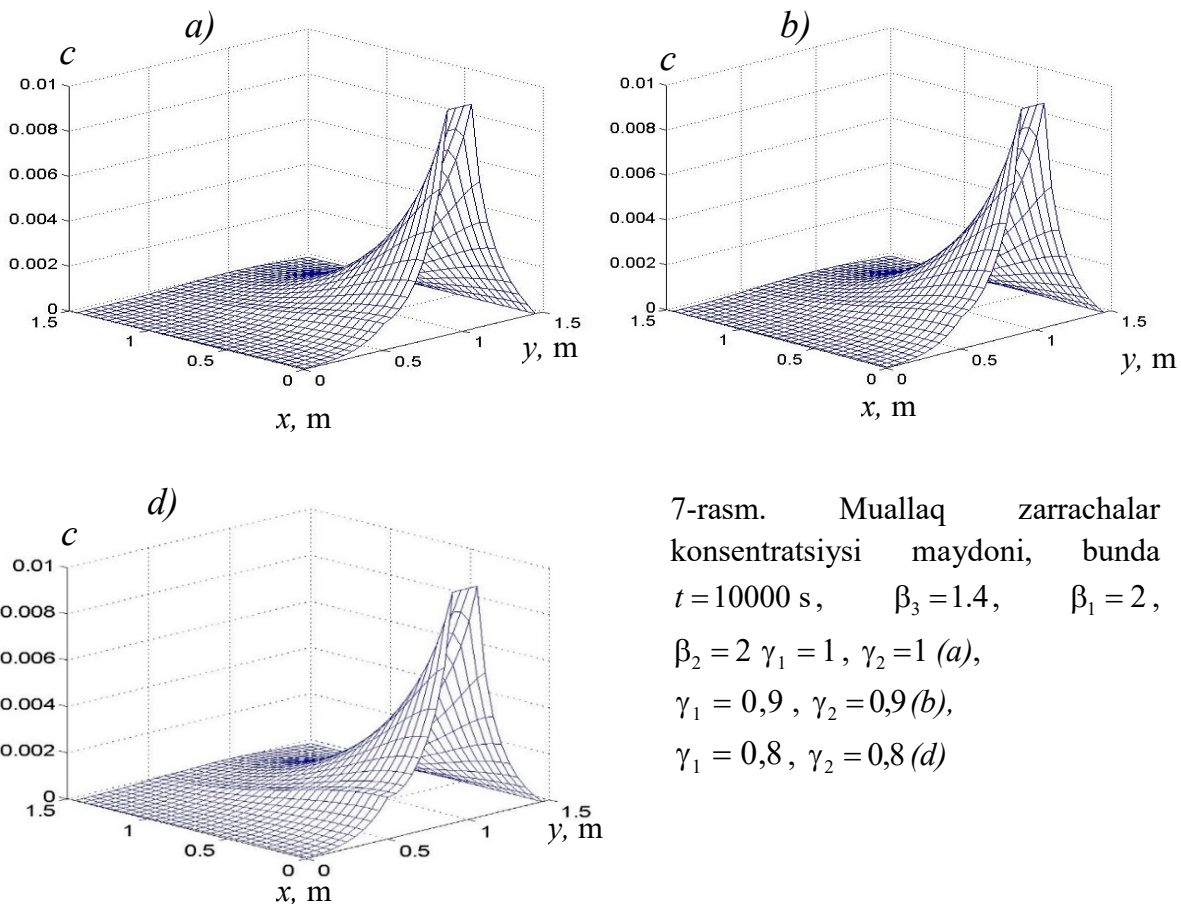
3.2 paragrafda fraktal strukturali ikki zonali sohada nuqtali manba holida suyuqlikning anomal sizishi masalasi qaraldi. Hamda Q , Q_{umum} va Q_{jam} qaraldi.

3.3 paragrafda masala §3.2 da ko‘rsatilgandek ko‘rib chiqiladi, faqat R^+ muhitning $x = 0$, $0 \leq y \leq h$ chegarasida kesmali manba holatiga umumlashtiriladi

$$c = \begin{cases} 0, & \text{agar } x = 0, \quad 0 \leq y < \delta_1 l, \quad \delta_2 l < y \leq l, \\ c_0, & \text{agar } x = 0, \quad \delta_1 l \leq y \leq \delta_2 l, \quad c_0 = \text{const}, \quad \delta_1, \delta_2 \leq 1. \end{cases} \quad (30)$$

shart bilan almashtirildi.

Nuqtali manba bilan solishtirganda, bu yerda c profili R^+ da ham R^- da ham kengroq sohani egalladi. 7-rasmda γ_1 va γ_2 larning turli hil qiymatlarida konsentratsiya maydonlari qaraldi. Hisoblash natijasi shuni ko‘rsatdiki, hosila tartiblari γ_1 va γ_2 1 dan kamayishi ikkala zonalarda ham tez diffuziyalanish jarayoni yuz berdi.



7-rasm. Muallaq zarrachalar konsentratsiyasi maydoni, bunda $t = 10000$ s, $\beta_3 = 1.4$, $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 2$ $\gamma_1 = 1$, $\gamma_2 = 1$ (a), $\gamma_1 = 0,9$, $\gamma_2 = 0,9$ (b), $\gamma_1 = 0,8$, $\gamma_2 = 0,8$ (d)

Dissertatsiyaning «G‘ovak muhitlarda suspenziyalarning kolmatatsion-suffuzion anomal sizish masalalarini yechish» deb ataluvchi 4-bobda fraktal tuzilishga ega bo‘lgan g‘ovak muhitda moddalarni ko‘chish va anomal sizish masalalari qo‘yilgan va sonli yechilgan. Massa balansi tenglamasi g‘ovaklikning o‘zgarishi kinetikasini hisobga olgan holda harakatlanuvchi aralashmadagi muallaq moddalar konsentratsiyasiga nisbatan yoziladi.

4.1 paragrafda g‘ovak muhitdagi kolmatatsion-suffuzion haqida umumiy ma’lumotlar keltirilgan.

4.2 paragrafda g‘ovak muhitlarda kolmatatsion-suffuzion anomal sizish masalasi shakllantirildi va sonli yechildi. Bosim, sizish tezligi, muallaq zarrachalar konsentratsiyasi va g‘ovaklik o‘zgarish profillari keltirilgan.

4.3 paragrafda suyuqlik harakatda va kam harakatda bo‘lgan g‘ovak muhitda kolmatatsion-suffuzion sizish masalasi tadqiq etildi.

4.3 paragrafda diffuziya va konveksiya hodisalarini hisobga olgan holda, ikki o‘lchovli g‘ovak muhitda dispers sistemalarning harakatlanuvchi va kam harakatdagi suyuqliklari bo‘lgan ikki zonadan tashkil topgan kolmatatsion-suffuzion anomal sizishi masalasi o‘rganildi. Binobarin, moddalarning anomal ko‘chishi va sizishi kasr hosilali differensial tenglamalar bilan tavsiflanadi. Berilgan masalalar sonli yechildi va sizish tezligi, g‘ovaklik va zarrachalarni ko‘chishining turli xususiyatlari baholandi.

G‘ovak muhitlarda suyuqliklarning harakatdagi va kam harakatdagi sizish masalasi o‘rganildi.

R^+ sohada suyuqlik x va y yo‘nalishlar bo‘yicha harakatlanadi. R^- sohada ham konvektiv-diffuzion, kolmatatsion-suffozion modda ko‘chishi sodir bo‘ladi. Yuqoridagilarni hisobga olgan holda R^+ va R^- da modda ko‘chishi jarayoni quyidagi tenglamalar bilan ifodalanadi

$$\varepsilon_{0r} \frac{\partial c_r}{\partial t} = \varepsilon_{0r} \left\{ D_{rx} \frac{\partial^{\beta_{rx}} c_r}{\partial x^{\beta_{rx}}} + D_{ry} \frac{\partial^{\beta_{ry}} c_r}{\partial y^{\beta_{ry}}} \right\} - \frac{\partial(v_{rx} c_r)}{\partial x} - \frac{\partial(v_{ry} c_r)}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t}, \quad r = 1, 2 \quad (31)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = \omega_1 (\varepsilon_{0r} - \varepsilon_r) |\nabla p_r| - \omega_2 \varepsilon_r c_r, \quad r = 1, 2, \quad (32)$$

bunda c_r – suyuqlikda qattiq zarrachalarning hajmiy konsentratsiyasi, ε_{0r} , ε_r – boshlang‘ich va joriy g‘ovakliklar, ω_1, ω_2 – g‘ovakliklardagi kolmatatsion-suffozion intensivligini tavsiflovchi koeffitsiyentlar, $|\nabla p_r|$ – p_r bosimlar gradiyenti modullari, bunda $r = 1 - R^+$ ga, $r = 2$ esa R^- ga mos keladi.

R^+ va R^- da sizish tezligi komponentlari quyidagicha aniqlanadi

$$v_{rx} = -\frac{k_{rx}(\varepsilon_r)}{\mu} \frac{\partial^{\gamma_1} p_r}{\partial x^{\gamma_1}}, \quad v_{ry} = -\frac{k_{ry}(\varepsilon_r)}{\mu} \frac{\partial^{\gamma_2} p_r}{\partial y^{\gamma_2}}, \quad r = 1, 2, \quad (33)$$

bunda $k_r(\varepsilon_r)$ – R^+ va R^- sohalar o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentlari, kolmatatsion-suffozion omillar hisobidan ε_r ning funksiyalari hisoblanadi.

Bosim gradiyentining moduli quyidagi munosabatlardan aniqlanadi

$$|\nabla p_r| = \sqrt{\left(\frac{\partial p_r}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_r}{\partial y}\right)^2}, \quad r = 1, 2. \quad (34)$$

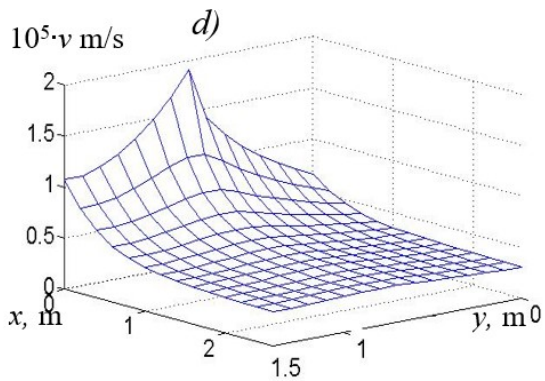
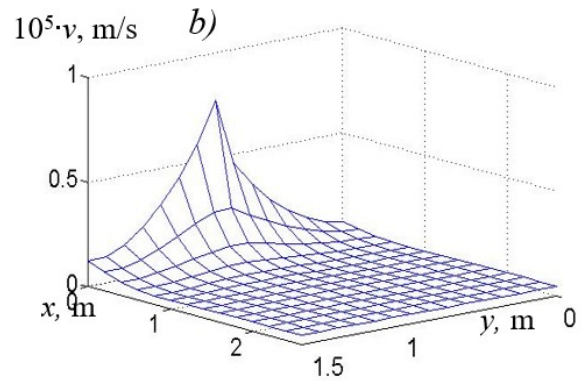
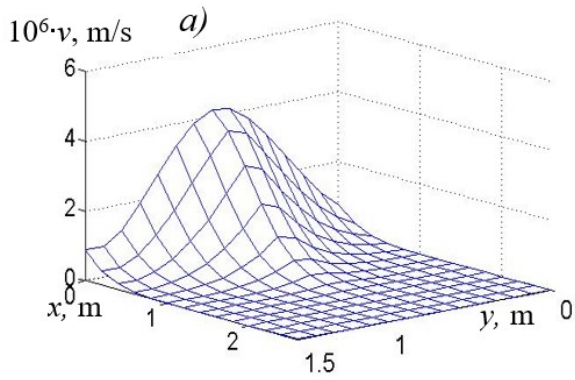
R^+ va R^- da pyezoo‘tkazuvchanlik tenglamalari quyidagicha olinadi

$$\frac{\partial p_r}{\partial t} = \chi_{rx}^*(p_r) \frac{\partial^{\gamma_{rx}+1} p_r}{\partial x^{\gamma_{rx}+1}} + \chi_{ry}^*(p_r) \frac{\partial^{\gamma_{ry}+1} p_r}{\partial y^{\gamma_{ry}+1}},$$

$$\chi_{rx}^*(p_r) = \chi_{rx}(\varepsilon_{0r} + \beta_r^*(p_r - p_0)), \quad \chi_{ry}^*(p_r) = \chi_{ry}(\varepsilon_{0r} + \beta_r^*(p_r - p_0)). \quad r = 1, 2. \quad (35)$$

Shunday qilib, R^+ va R^- sohalarida (31) balans tenglamalari, (32) kinetika tenglamalari, (33) anomal Darsi qonunlari va (35) pyezoo‘tkazuvchanlik tenglamalaridan tashkil topgan moddaning kolmatatsion-suffozion ko‘chishi tenglamalar sistemasini hosil qilamiz.

Tenglamalar sistemasi chekli ayirmalar usuli bilan yechildi. Sonli tajribalar asosida ikkala sohada sizish tezligi, bosim, konsentratsiya va g‘ovaklik maydonlari aniqlandi. 8-10 rasmlarda bosim va sizish tezligi maydonlari ko‘rsatilgan. Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, hosila tartibi γ_{rx} va γ_{ry} larning 1 dan kamayishi ikkala zonalarda tezlik va bosimni oshishi kuzatildi. 11-rasmda konsentatsiya maydonlari keltirildi. Sizish tezligidagi γ_{rx} va γ_{ry} hosila tartibi 1 dan kamayishi ikkala zonalarda konsentatsiya kengroq tarqalishi kuzatildi.



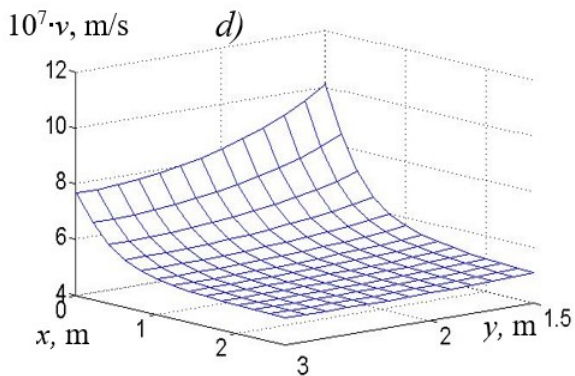
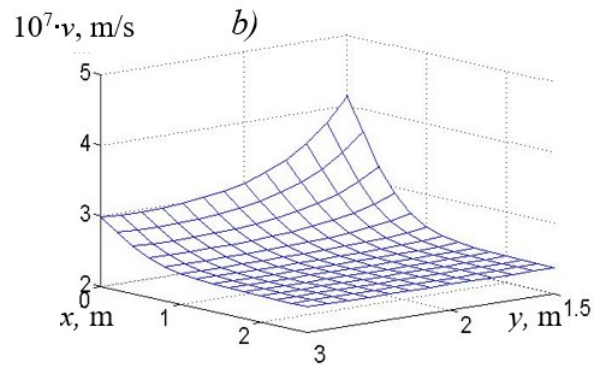
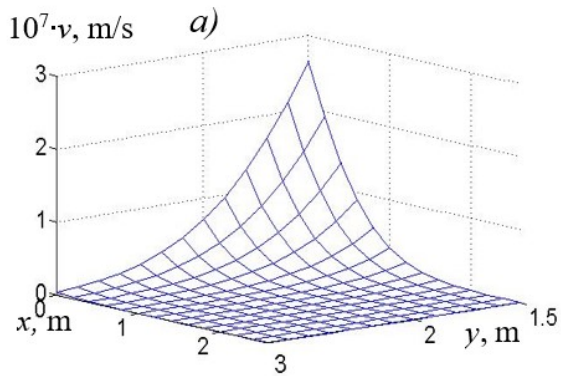
8-rasm. Birinchi zonada sizish tezligi maydoni, bunda: $t = 2000 \text{ s}$,

$$\beta_{1x} = \beta_{1y} = \beta_{2x} = \beta_{2y} = 1;$$

$$\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 1$$

(a) $\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 0,9$

(b) $\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 0,8$ *(d)*



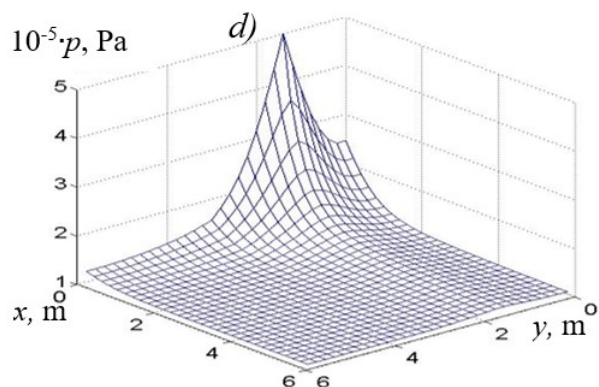
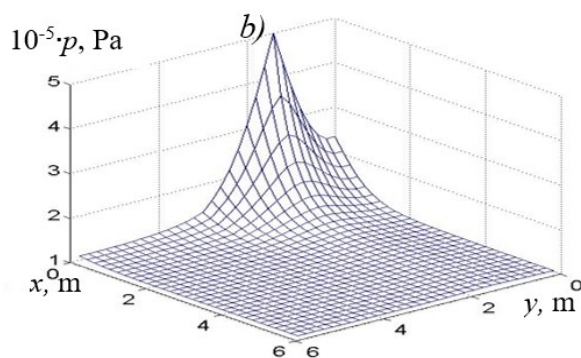
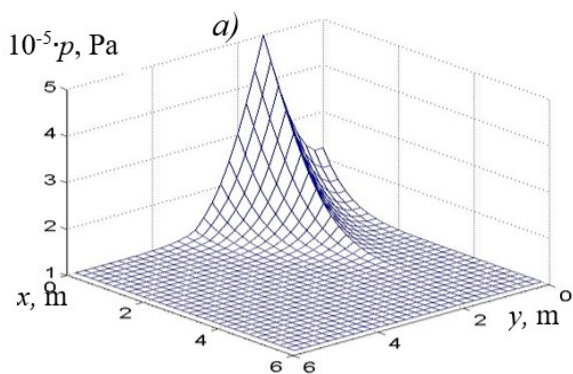
9-rasm. Ikkinchi zonada sizish tezligi maydoni, bunda: $t = 2000 \text{ s}$,

$$\beta_{1x} = \beta_{1y} = \beta_{2x} = \beta_{2y} = 1;$$

$$\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 1$$

(a) $\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 0,9$

(b) $\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 0,8$ *(d)*



10-rasm. Bosim maydoni, bunda:

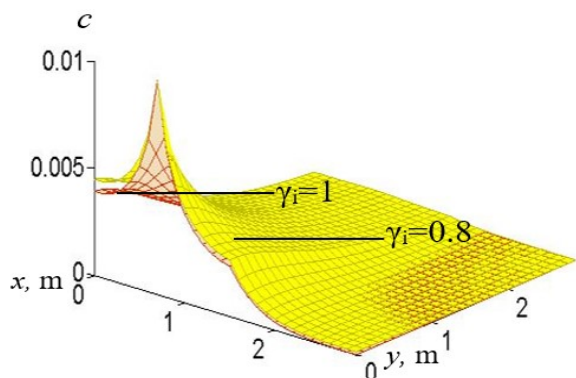
$$t = 2000 \text{ s,}$$

$$\beta_{1x} = \beta_{1y} = \beta_{2x} = \beta_{2y} = 1;$$

$$\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 1$$

$$(a) \gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 0,9$$

$$(b) \gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 0,8 \quad (d)$$



11-rasm. Muallaq zarrachalar konsentratsiysi maydoni, bunda

$$t = 10000 \text{ s, } \beta_{1x} = \beta_{1y} = \beta_{2x} = \beta_{2y} = 2$$

Xulosa

1. Fraktal tuzilishga ega bo'lgan bir o'lchovli g'ovak muhitda suspenziyalarning ko'chishi va sizishi masalasi ko'rib chiqildi. Anomal Darsi qonuni asosida bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitlarda modda ko'chishi va sizishi jarayonlarining matematik modeli takomillashtirildi. Hisoblash natijalari shuni ko'rsatdiki, sizish tezligi tenglamasidagi hosila tartibining 1 dan kamayishi bosim va sizish tezligining oshishi kuzatildi. Diffuzion haddagi hosila tartibining 2 dan kamayishi diffuziya jarayonining "tezlashishiga" va konsentratsiya profillarining kengroq tarqalishiga olib kelishi ko'rsatilgan.

2. Fraktal tuzilishga ega bo'lgan ikki o'lchovli g'ovak muhitda massa ko'chish masalasi qaraldi. Moddaning bunday muhitda ko'chishi vaqt va koordinataga nisbatan kasr hosilali tenglama bilan tavsiflanadi. Tegishli boshlang'ich va chegaraviy shartlarda tenglamaning sonli yechimiga asoslanib,

kasr hosila tartibi 2 dan pasayishi diffuziya jarayonining tezlashishiga olib kelishi, ya'ni "tez diffuziya" jarayoni sodir bo'lishi ko'rsatilgan.

3. Ikki zonali fraktal muhitda modda ko'chish va sizish masalasi tahlil qilindi va sonli yechildi. Diffuziya hadidigi hosila tartibi 2 dan kamayishi diffuziya jarayonining "tezlanishiga" olib kelishi ko'rsatilgan. R^- zonada ko'chishning diffuziya hadidagi hosila tartibi 2 dan kamayishi faqat R^- zonadagi ko'chish xarakteristikalariga tasir qilishi, R^+ zonada ko'chishning diffuziya hadidagi hosila tartibini 2 dan kamayishi esa ikkala zonada ham ko'chish xarakteristikalariga tasiri kuzatildi.

4. Zonalarning umumiy chegarasi bo'ylab moddaning nisbiy oqimi aniqlandi. R^+ dagi ko'chish tenglamasining diffuziya hadidagi hosila tartibi 2 dan kamayishi zona chegarasi bo'ylab nisbiy modda oqimining oshishiga olib keladi.

5. Harakatdagi va kam harakatdagi suyuqlik sohalaridan tashkil topgan fraktal strukturali g'ovak muhitda kolmatatsion-suffozion sizish matematik modeli takomillashtirildi. Harakatdagi va kam harakatdagi sohalarning umumiy chegarasida moddaning konvektiv-diffuzion ko'chishi sodir bo'lib, harakatdagi suyuqlik sohasida modda konsentratsiyasi, muhit g'ovakligi, bosim profillariga kuchli ta'sir o'tkazishligi namoyon bo'ldi. Sonli natijalar asosida muallaq zarrachalar konsentratsiyasi, muhitning g'ovakligi, sizish tezligi va bosim maydonlari aniqlandi. Kasr hosilasining tartiblari va model parametrlarining muhitning sizish xususiyatlariga ta'siri tahlil qilindi. Hisoblash natijalari shuni ko'rsatadiki, sizish tenglamasida hosila tartibining 1 dan kamayishi muallaq zarrachalar harakati uzoqroq masofalarga borishi kuzatildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИМЕНИ ШАРАФА РАШИДОВА**

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ШАРАФА РАШИДОВА**

КУЛЖАНОВ ЖАХОНГИР БАХТИЁРОВИЧ

**ЗАДАЧИ АНОМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ В
НЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

01.02.05 – Механика жидкости и газа

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

Самарканд – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2022.4.PhD/FM799.

Диссертация выполнена в Самаркандском государственном университета имени Шарафа Рашидова.

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

Научный руководитель:

Махмудов Жамол Махмуд угли
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Бурнашев Владимир Фидратович
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Худойкулов Савет Ишанкулович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М.Т.Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2024 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 при Самаркандском государственном университета имени Шарафа Рашидова (Адрес: 104000, г. Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (+99866) 239-11-40, факс: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: devonxona@samdu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета имени Шарафа Рашидова (регистрационный номер ____). Адрес: 140104, Самарканд, Университетский бульвар, 15. (+99866) 239-17-25.

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2024 года.
(реестр протокола рассылки № ____ от « ____ » _____ 2024 года.)

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

У.А.Нишонов
Ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней,
доктор философии по физико-математических наук

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии(PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Около 30% людей во всем мире сталкиваются с проблемой нехватки воды. Вопросам обеспечения питьевой водой промышленности, сельского хозяйства и населения уделяется большое внимание. По данным ООН, «Подземные воды обеспечивают 50% воды, используемой населением мира для бытовых целей, и около 25% всей воды, используемой для орошения. В течение следующих 30 лет потребление воды в мире будет увеличиваться примерно на 1% в год. Возрастающий дефицит воды в некоторых регионах мира требует более ответственного и рационального подхода к использованию подземных вод»³. В связи с этим во многих зарубежных странах, в том числе в США, Китае, Российской Федерации и других развитых странах, ведутся поиски путей при предотвращении загрязнения подземных вод, очистки питьевых и сточных вод, при прогнозировании и анализа эксплуатации нефтяных месторождений вторичными и третичными методами требуются реализации адекватных математических моделей фильтрации неоднородных жидкостей в неоднородных пористых средах. В связи с этим аппарат дифференциальных уравнений дробного порядка используется для математического моделирования физико-механических процессов сложной геометрии. В частности, особое внимание уделяется созданию и исследованию математических моделей, разработанных на основе дробно-дифференциальных уравнений для выражения аномальных процессов фильтрация суспензий в пористых средах с фрактальной структурой.

На сегодняшний день в мире проводятся научные исследования, направленные на анализ процесса аномальной фильтрации неоднородной жидкости в пористой среде с фрактальной структурой. В этом направлении приоритетными считаются исследования по построению математических моделей процессов фильтрации жидкости и газа и их численное исследование. При этом особое внимание уделяется совершенствованию математических моделей процессов аномальной фильтрации жидкостей и газов в пористых средах на основе дробно-дифференциальных уравнений, разработке эффективных алгоритмов расчета и программ решения задач.

В нашей республике особое внимание уделяется созданию математических и численных моделей, а также алгоритмов гидродинамических процессов, связанных с фильтрацией дисперсных жидкостей и переноса вещества в неоднородных пористых средах, и разработке мер практической реализации. В стратегии развития Нового Узбекистана на период 2022-2026 годы определены важные задачи, в том числе «довести уровень обеспечения населения республики питьевой водой до 87%, обновить канализационные системы в 32 крупных городах и 155

³ Доклад ООН о состоянии мировых водных ресурсов, 2022 г.
https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/un_world_water_dev_report_2022.pdf

районных центров...»⁴. Одной из важных задач является реализация этих задач, включающая моделирование процессов очистки вод, воздействие на нефтегазоносные пласты вторичными методами, совершенствование математических моделей процессов, создание эффективных алгоритмов численного решения и программного обеспечения.

Данная диссертационная работа в определенной степени служит реализации задач, предусмотренных в постановлениях Президента Республики Узбекистана УП-74 от 7 мая 2024 года «Об определении приоритетных направлений внедрения и развития современной системы управления в водном хозяйстве», ПП-257 от 24 мая 2022 года «О дополнительных мерах по повышению уровня обеспеченности питьевой водой и сточными водами населению», ПП-3823 от 2 июля 2018 года «О мерах по повышению эффективности использования водных ресурсов» и ПП-3107 от 30 июня 2017 года «Об усовершенствовании системы управления нефтегазодобывающей промышленностью» а также других нормативно-правовыми документами, принятыми в данной области.

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

Степень изученности проблемы. За последние годы разработка и усовершенствование гидродинамических моделей аномальной фильтрации и переноса веществ в неоднородных пористых средах и их численная реализация рассмотрены в работах таких ученых, как, V.V. Mityushev, J. Kim, J. Lee, K.C. Lee, J.Bear, M. Caputo, F. Wang, P.M. Adler, A.E. Malevich, G.Brown, R.Raghavan, K.H.Coats, B.D.Smith, I.Hashimoto, N.W.Haws, E.L.Cussler, M.M.Rahman, A.S.Fomin, V.A.Chugunov, T.Hashida, A.D.Benson, F.Huang, F.Liu, J.Birkholzer, R.Schumer, N.R.Horne, H.Zhan, B.F.A.Tompson, A.X.Мирзаджанзаде, Р.И.Нигматулин, Н.С.Белевцов и др.

В Узбекистане существенную лепту в разработку гидродинамических моделей и вычислительных методов для исследования процессами фильтрации жидкости и газа в пористых средах внесли отечественные ученые Э.Б.Абуталиев, Н.М.Мухиддинов, Р.Садуллаев, Дж.Ф.Файзуллаев, И.Алимов, Ф.Б.Абуталиев, Б.Х.Хужаёров, Ж.Акилов, И.К.Хужаев, Н.Равшанов, С.Худайкулов, Ш.Каюмов, З.М.Маликов, В.Ф.Бурнашев и др.

Следует отметить, что ряд существующих моделей аномальной фильтрации в пористых средах отражают в себя важные свойства этих процессов. Аппарат дифференциальных уравнений с дробными производными только начинает использоваться для описания процесса аномальной фильтрации и переноса вещества в средах с фрактальной структурой. Однако на основе этих математических моделей вопросы

⁴ Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года ПП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы».

аномальной фильтрации в пористой среде с фрактальной структурой изучены недостаточно.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ Самаркандского государственного университета имени Шарафа Рашидова №19.12 «Разработка математических моделей и численный анализ инженерных и природных процессов» (2000-2018 гг), ОТ-Ф4-64 «Составление и численный анализ гидродинамических моделей фильтрации жидкости и переноса веществ в неоднородных пористых средах» (2017-2020 гг).

Целью исследования разработка математических моделей аномальной фильтрации и переноса суспензий в неоднородной пористой среде с фрактальной структурой на основе аномального закона Дарси и аномального закона Фика.

Задачи исследования:

усовершенствование гидродинамических моделей процесса фильтрации дисперсных жидкостей в пористой среде с фрактальной структурой на основе аномального закона Дарси;

усовершенствование гидродинамических моделей процессов фильтрации суспензии и переноса в двухзонных пористых средах, а также разработка эффективных численных алгоритмов;

разработка и численное исследование фильтрации суспензии и аномального переноса вещества в неоднородных пористой среде с учетом ретардационных факторов и неоднородного распределения поля скоростей фильтрации;

усовершенствование гидродинамической модели кольтматационно-суффозионной фильтрации дисперсной жидкости в пористой среде с фрактальной структурой с подвижной и малоподвижной жидкостью на основе аномального закона Дарси.

Объектом исследования является одно- и двухзонная пористая среда с фрактальной структурой.

Предметом исследования является математические и гидродинамические модели, вычислительные алгоритмы и гидродинамический анализ процессов аномальной фильтрации дисперсных жидкостей и переноса вещества в пористой среде с фрактальной структурой.

Методы исследования. В процессе исследования использованы фундаментальные законы сохранения механики, дробные законы Дарси и Фика, основные уравнения теории фильтрации, методы математического и численного моделирования.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

усовершенствована математическая модель процесса фильтрации суспензий в неоднородных пористых средах с учетом аномальности процесса фильтрации, фрактальности структуры пористой среды и разработан

вычислительный алгоритм решения задач в одно- и двумерном случаях методом конечных разностей;

усовершенствована математическая модель процесса фильтрации и переноса суспензии в двухзонной пористой среде с учетом дробных законов Дарси и Фика, ретардационного фактора в процессе фильтрации, оценено влияние порядка дробной производной на характеристики фильтрации;

усовершенствовано уравнение пьезопроводности с учетом аномального процесса фильтрация в неоднородных пористых средах, а также определены текущий, общий и суммарный относительный потоки вещества, проходящего через общую границу двухзонных сред при различных значениях порядка дробной производной;

усовершенствована математическая модель фильтрации неоднородной жидкости в двухзонной пористой среде с учетом кольматации и суффозии пор, и разработан алгоритм расчета для решения задач.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

составлен алгоритм вычисления аномальной фильтрации суспензии в неоднородной пористой среде с фрактальной структурой;

разработан эффективный алгоритм численного решения задачи фильтрации дисперсной жидкости в пористой среды с фрактальной структурой;

разработано программное средство для решения задач аномальной фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах.

Достоверность результатов исследования. При составлении уравнений процессов аномальной фильтрации и переноса вещества в пористой среде с фрактальной структурой использованы фундаментальные законы баланса массы, аномальных законов Дарси и Фика. При численном решении задач проверена их устойчивость. На основе численных результатов проведен физический анализ и оценка их соответствия реальным гидродинамическим процессам.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в усовершенствовании моделей аномальной фильтрации в неоднородных средах. Разработанные модели и алгоритмы являются определенным вкладом в теорию аномальной фильтрации жидкости в неоднородных пористых средах.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы как при анализе процессов добычи нефти и газа третичными методами, качественном и количественном анализе процессов очистки сточных вод и питьевой воды, гидрологии, так и в разработке методического подхода изучения явлений фильтрация суспензии и перенос вещества в пористых средах.

Внедрение результатов исследования. На основе эффективных вычислительных алгоритмов и программных продуктов для численного исследования усовершенствованных математических моделей аномальной

фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах с фрактальной структурой:

С учетом явлений диффузии и конвекции разработан алгоритм расчета и численного анализа моделей аномального кольтационно–суффозионной, состоящих из двух зон с подвижной и малоподвижной жидкости. Полученные результаты были использованы управлением Сырдарьинско-Зарафшанского бассейна ирригационной системы Джизакской области, поставлена с целью: оценки площади распространения различных вредных веществ, поступивших с водой при наполнении водоема водой, а также сокращения времени и трудозатрат на проведение инженерных расчетов (Свидетельство Республики Узбекистан № 03/37-2604 Министерства водного хозяйства от 16 августа 2023 года).

Оценен процесс оседания веществ на дно плотины и водохранилища, определены площади распределения различных механических частиц, поступивших в водоем, позволило повысить точность инженерных работ на 7-8%;

на основе алгоритма и программы численного решения задачи с учетом фрактальности структуры пласта в задачах орошения, оценено влияние роли кольтационно-суффозионных эффектов в процессе переноса суспензии. Это позволило сократить время и трудозатраты, необходимые для инженерных расчетов.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования обсуждены 7 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 7 входит в перечень научных изданий, предложенных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации результатов диссертационных работ, в том числе 4 опубликовано в зарубежных и 3 в республиканских научных журналах, а также получено свидетельство о регистрации программного продукта для ЭВМ (№ DGU 21966).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Объем диссертации составляет 109 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В введении обоснованы востребованность и актуальность темы диссертации, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, приведены обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации и степень изученности проблемы, составлены цели и задачи, выявлен объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта теоретическая и практическая значимость

полученных результатов, даны сведения о внедрении результатов исследования, об опубликованных работах и о структуре диссертации.

В первой главе диссертации, названной **«Аномальная фильтрация жидкости в пористых средах»**, приводится анализ проблем моделирования процесса аномального переноса веществ в неоднородных пористых средах. Рассматривается аномальный перенос вещества на основе диффузионного подхода, анализируется влияние адсорбционных явлений. Проведен анализ численных методов решения задачи аномального переноса веществ в неоднородной пористой среде.

В параграфе 1.1 дается обзор по аномальной фильтрации жидкости в неоднородных средах. На основе известных литературных источников приводятся общие сведения

В параграфе 1.2 дается обзор по математическому моделированию процессов аномальной фильтрации в пористых средах. В средах с фрактальной структурой при моделировании широко используется дифференциальные уравнения дробного порядка.

В параграфе 1.3 дается обзор по методам решения задачи аномальной фильтрации в пористых средах.

Во второй главе диссертации, названной **«Задачи аномальной фильтрации суспензии в пористой среде»**, поставлена и численно решена задача аномальной фильтрации суспензии в среде с фрактальной структурой на основе дробного закона Дарси.

В параграфе 2.1 поставлена и численно решена задача аномальной фильтрации в пористой среде с фрактальной структурой. Предложено уравнение пьезопроводности с дробной производной на основе аномального закона Дарси. Определены профили изменения концентрации взвешенных частиц, давления и скорости фильтрации. Оценены различные характеристики переноса и фильтрации.

Первоначально область заполнена жидкостью без частиц. Конвективно-диффузионный перенос суспензии с учетом аномальных эффектов можно описать уравнением

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^\beta c}{\partial x^\beta} - \frac{\partial(vc)}{\partial x}, \quad (1)$$

где c – концентрация твердых частиц в жидкости, v – скорость фильтрации, D – коэффициент диффузии, β – показатель производной, t – время, x – координата.

Скорость аномальной фильтрации на основе дробного закона Дарси определяется как

$$v = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial^\gamma p}{\partial x^\gamma}, \quad (2)$$

где p – давление, μ – коэффициент вязкости суспензии, k – коэффициент проницаемости, γ – показатель производной.

Уравнение неразрывности течения сжимаемой жидкости через пористую среду можно записать как

$$\frac{\partial(\rho m)}{\partial t} + \operatorname{div}(\bar{\rho} v) = 0, \quad (3)$$

где m – коэффициент пористости, ρ – плотность жидкости.

Используем уравнения состояния упругой жидкости и упругой пористой среды

$$\rho = \rho_0(1 + \beta_{жс}(p - p_0)), m = m_0 + \beta_c(p - p_0), \quad (4)$$

где $\beta_{жс}$ – коэффициент объемного сжатия жидкости, β_c – коэффициент упругости среды, ρ_0 – первоначальная плотность жидкости, p_0 – первоначальное давление.

Подставив (2), (4) в (3), можно получить уравнение пьезопроводности с дробной производной

Уравнение пьезопроводности имеет следующий вид

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi \frac{\partial^{\gamma+1} p}{\partial x^{\gamma+1}}, \quad (5)$$

где $\chi = \frac{k}{\mu\beta^*}$ – коэффициент пьезопроводности, β^* – коэффициент упругоёмкости среды.

Начальные и граничные условия задачи имеют вид

$$c(0, x) = 0, \quad (6)$$

$$c(t, 0) = c_0, c_0 = \text{const}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x}(t, l) = 0, \quad (8)$$

$$p(0, x) = p_0, p_0 = \text{const}, \quad (9)$$

$$p(t, 0) = p_c, p_c > p_0, p_c = \text{const}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}(t, l) = 0. \quad (11)$$

Задачи (1), (2), (5) – (11) решаются методом конечных разностей. В расчетах использованы следующие значения исходных параметров: $k = 10^{-13} \text{ м}^{1+\gamma}$, $\mu = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\beta^* = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$, $p_c = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $p_0 = 10^5 \text{ Па}$, $c_0 = 0,01$ и $D = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^\beta/\text{с}$.

Некоторые результаты представлены на рис. 1-2. Полученные результаты показывают, что уменьшение значений γ от 1 приводит к увеличению эффектов аномального фильтрации и диффузионного процесса. Из этого заметить усиление диффузионных эффектов по направлению когда, принимает значения, меньше чем 1 и 2 (рис. 1).

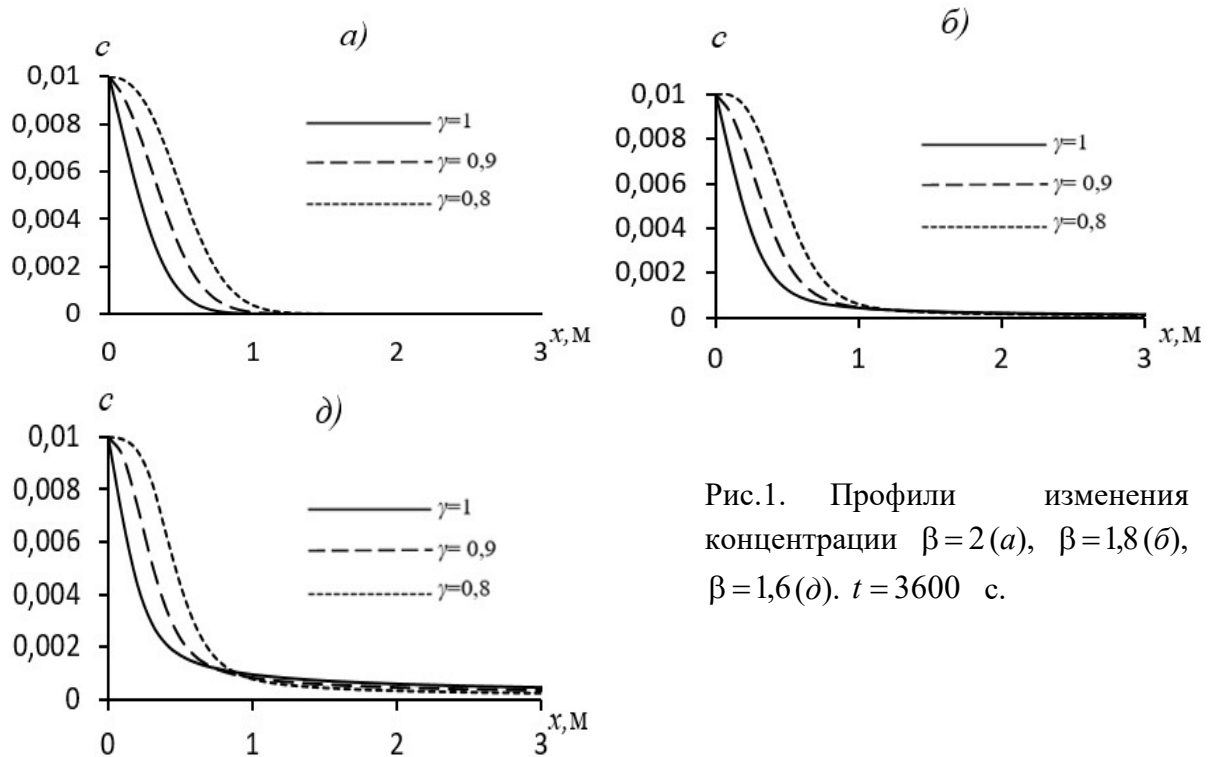


Рис.1. Профили изменения концентрации $\beta=2$ (а), $\beta=1,8$ (б), $\beta=1,6$ (д). $t=3600$ с.

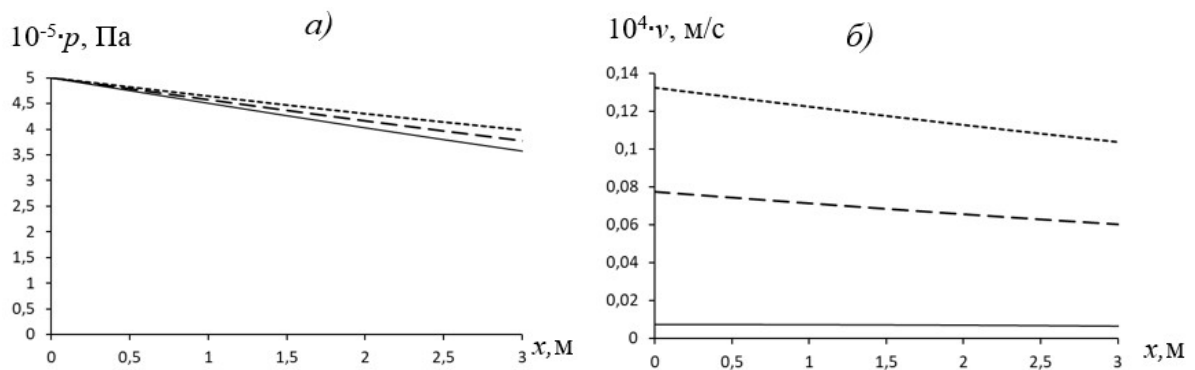


Рис.2. Изменения p (а) и v (б) при $\gamma=1$, $\gamma=0,9$, $\gamma=0,8$, $\beta=2$, $t=3600$ с.

В параграфе 2.2 в отличие от задачи п. 2.1, рассматривается двумерная задача. Пусть область исследования задачи состоит из $R\{0 \leq x < \infty, 0 \leq y \leq h\}$. Верхняя и нижняя граница области R непроницаема для жидкости и частиц. Жидкость движется в направлениях x и y в области R . Система уравнений фильтрации суспензии, состоящей из уравнения баланса, аномального закона Дарси и уравнения пьезопроводности имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} &= D_x \frac{\partial^{\beta_1} c}{\partial x^{\beta_1}} + D_y \frac{\partial^{\beta_2} c}{\partial x^{\beta_2}} - \frac{\partial(v_x c)}{\partial x} - \frac{\partial(v_y c)}{\partial x}, \\ v_x &= -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial^{\gamma_1} p}{\partial x^{\gamma_1}}, \quad v_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial^{\gamma_2} p}{\partial x^{\gamma_2}}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= \chi_x \frac{\partial^{\gamma_1+1} p}{\partial x^{\gamma_1+1}} + \chi_y \frac{\partial^{\gamma_2+1} p}{\partial x^{\gamma_2+1}}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \beta_1, \beta_2$ - показатели производной.

Результаты расчетов показывают, что уменьшение показателя производной в уравнении скорости аномальной фильтрации от 1 приводит к увеличению давления и скорости фильтрации. Уменьшение показателя производной в диффузионном члене от 2 приводит к “ускорению” диффузионного процесса.

При фильтрации суспензии в пористой среде часть твердых взвешенных частиц могут осаждаются в поровом пространстве. В параграфе 2.3 решается задача фильтрация в двумерной среде с фрактальной структурой с учетом ретардационных факторов.

Уравнение баланса с учетом ретардационных факторов имеет вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} + a \frac{\partial^\delta c}{\partial t^\delta} = D_x \frac{\partial^{\beta_1} c}{\partial x^{\beta_1}} + D_y \frac{\partial^{\beta_2} c}{\partial y^{\beta_2}} - \frac{\partial(v_x c)}{\partial x} - \frac{\partial(v_y c)}{\partial y}, \quad (13)$$

где a – ретардационный фактор, δ – показатель производной

Компоненты скорости фильтрации определяются как

$$v_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad v_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y}. \quad (14)$$

Для давления используем уравнение пьезопроводности в виде

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \chi_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \chi_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}, \quad (15)$$

Итак, получена система уравнений переноса суспензии, состоящая из уравнения баланса (13), закона Дарси (14) и уравнения пьезопроводности (15)

Начальные и граничные условия задачи имеют вид

$$c(0, x, y) = 0, \quad (16)$$

$$c(t, 0, y) = c_0, c_0 = \text{const}, \quad y = h/2, \quad (17)$$

$$\frac{\partial c}{\partial y}(t, x, 0) = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (18)$$

$$\frac{\partial c}{\partial y}(t, x, h) = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (19)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x}(t, 0, y) = 0, \quad y \in [0; h/2) \cup (h/2; h], \quad (20)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x}(t, \infty, y) = 0, \quad 0 \leq y \leq h, \quad (21)$$

$$p(0, x, y) = p_0, \quad p_0 = \text{const}, \quad (22)$$

$$p(t, 0, y) = p_c, \quad p_c > p_0, \quad p_c = \text{const}, \quad y = h/2, \quad (23)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y}(t, x, 0) = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (24)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y}(t, x, h) = 0, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (25)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}(t, 0, y) = 0, y \in [0; h/2) \cup (h/2; h], \quad (26)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}(t, \infty, y) = 0, \quad 0 \leq y \leq h. \quad (27)$$

Система (13) – (15) с граничными и начальными условиями (16) - (27) решается с методом конечных разностей

Как видно из рис.3-4, начиная от точки подачи жидкости образуется зона движения жидкости и соответствующее поле давления. Концентрационное поле для различных значений приведено на рис.5. Как видно из представленных расчетов, с уменьшением δ от 1 происходит замедление распространения концентрационного поля.

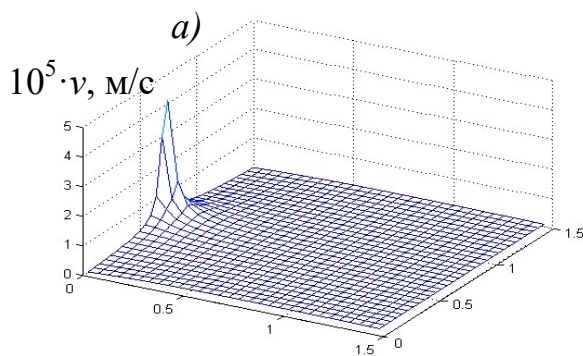


Рис.3. Поле скорости фильтрации при $t = 3600$ с.

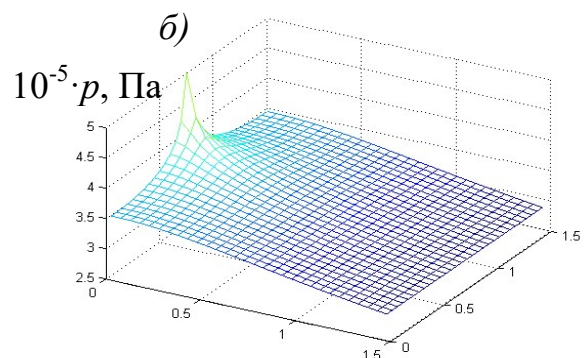


Рис.4. Поле давления при $t = 3600$ с.

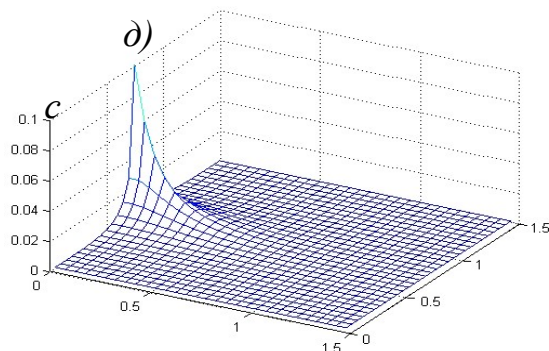
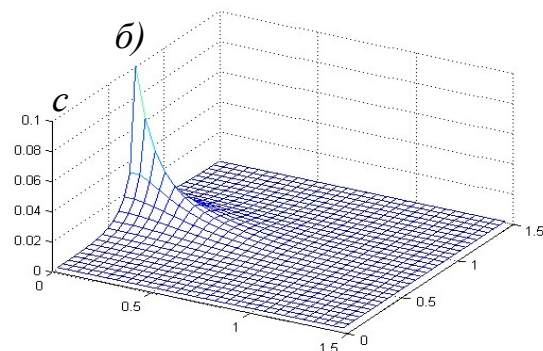
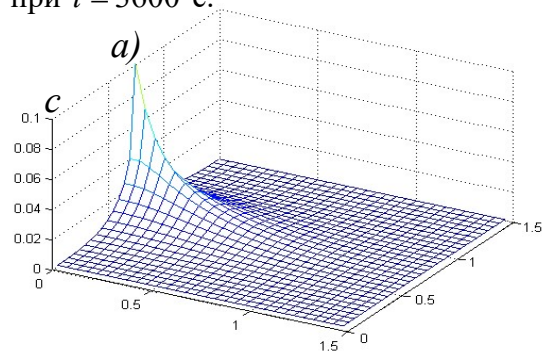


Рис.5. Поле концентрации при $t = 3600$ с, $\delta = 1$ (а), $0,8$ (б), $0,6$ (в), $D_x = 5 \cdot 10^{-5}$ м ^{β_1} /с, $D_y = 10^{-5}$ м ^{β_2} /с, $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 2$, $a = 10^{-3}$ с ^{$\gamma-1$} .

В третьей главе диссертации, названной «Задачи аномальной фильтрации в двухзонных неоднородных средах с фрактальной структурой», поставлены и численно решены задачи переноса веществ и аномальной фильтрации в двухзонной пористой среде с фрактальной структурой

В параграфе 3.1 рассматривается задача переноса вещества в двухзонных пористой среде с фрактальной структурой. Таким образом, область исследования состоит из двух зон, т.е. $R^+ \{0 \leq x < \infty, 0 \leq y \leq h\}$, $R^- \{0 \leq x < \infty, -\infty < y \leq 0\}$ (Рис.6). R^+ представляет собой область с подвижной жидкостью, а R^- – с неподвижной. Начиная с $t > 0$ в центре левой границы R^+ , т.е. $x = 0, y = h/2$ подается жидкость, содержащая твердые взвешенные частицы с концентрацией c_0 , т.е.

$$c = \begin{cases} c_0, & x = 0, \quad y = h/2, \\ 0, & x = 0, \quad y \neq h/2. \end{cases} \quad (28)$$

Таким образом, в R^+ осуществляется конвективный перенос твердого вещества, сопровождающийся продольной и поперечной диффузией (13).

В R^- происходит только диффузионный перенос вещества в продольном направлении. Заметим, что продольным направлением в R^- , в отличие от R^+ , считается направление от 0 к $-y$.

Процесс переноса вещества в R^- описывается уравнением

$$\frac{\partial c}{\partial t} + a_3 \frac{\partial^{\gamma_3} c}{\partial t^{\gamma_3}} = D_3 \frac{\partial^{\beta_3} c}{\partial y^{\beta_3}}, \quad (x, y) \in R^-, \quad (29)$$

где D_3 – эффективный коэффициент диффузии, a_3 – ретардационный фактор, γ_3, β_3 – показатели производной.

В R^+ процесс движения смеси подчиняется обобщенному закону Дарси (14). Уравнение пьезопроводности имеет вид (15).

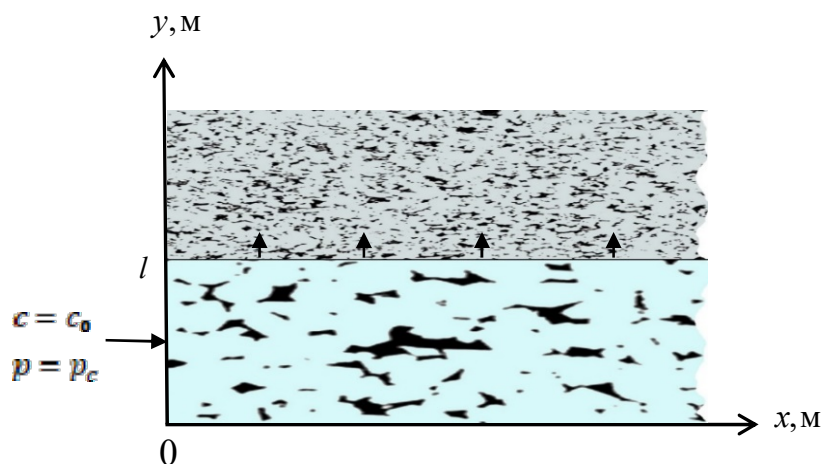


Рис.6. Схема фильтрации и переноса вещества в двухзонной среде

Через общую границу областей R^+ и R^- происходит перенос массы вещества (частиц). В R^+ когда $x \rightarrow \infty$, и в R^- когда $y \rightarrow -\infty$ считаем, что потоки вещества отсутствуют.

Задачи решаются методом конечных разностей. Поставлена и численно решена задача фильтрации и переноса веществ в двухзонной фрактальной среде. Показано, что уменьшение показателя производной в диффузионном

члена от 2 приводит к “ускорению” диффузионного процесса. И наоборот, уменьшение порядка производной в члене с локальной производной по времени от 1 приводит к замедлению диффузионного процесса.

В параграфе 3.2 рассматривается задача аномальной фильтрации с точечным источником в двухзонной среде фрактальной структуры. Рассмотрены также Q , $Q_{\text{общ}}$ и $Q_{\text{сум}}$.

В параграфе 3.3 рассматривается задача аналогичная §3.2, но с полосообразным источником на границе $x = 0$, $0 \leq y \leq h$ области R^+

$$c = \begin{cases} 0, & \text{если } x = 0, \quad 0 \leq y < \delta_1 l, \quad \delta_2 l < y \leq l, \\ c_0, & \text{если } x = 0, \quad \delta_1 l \leq y \leq \delta_2 l, \quad c_0 = \text{const}, \quad \delta_1, \delta_2 \leq 1. \end{cases} \quad (30)$$

По сравнению с точечным источником здесь профили c занимают более широкую область как в R^+ , так и в R^- . На рис.7 показано изменение профилей концентрации при различных значениях γ_1 и γ_2 . Полученные результаты показывают, что уменьшение значений γ_1 и γ_2 от 1 приводит к увеличению эффектов аномальной фильтрации и диффузионного процесса в обеих зонах.

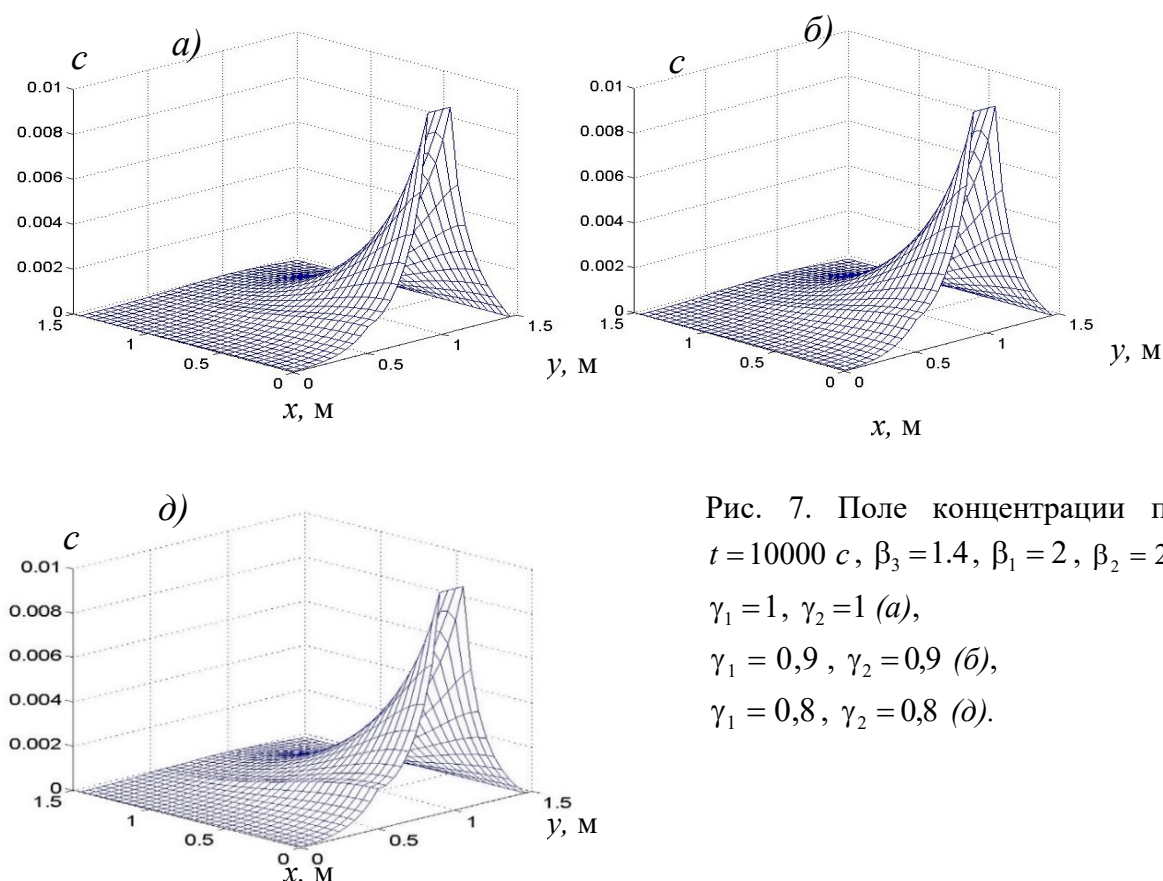


Рис. 7. Поле концентрации при $t = 10000$ с, $\beta_3 = 1.4$, $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 2$;
 $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 1$ (а),
 $\gamma_1 = 0,9, \gamma_2 = 0,9$ (б),
 $\gamma_1 = 0,8, \gamma_2 = 0,8$ (д).

В четвертой главе диссертации «Решение задач кольтационно-суффозионной фильтрации суспензии в пористой среде с фрактальной структурой» поставлены и численно решены задачи переноса веществ и аномальной фильтрации в пористой среде с фрактальной структурой. Уравнение баланса массы записывается относительно концентрации

твёрдого взвешенного вещества в движущейся смеси с учетом кинетики изменения пористости.

В параграфе 4.1 даны общие представления о кольматации-суффозии в пористых средах.

В параграфе 4.2 поставлена и численно решена задача кольматационно-суффозионной аномальной фильтрации в пористой среде. Определены профили изменения пористости, концентрации взвешенных частиц, давления и скорости фильтрации.

В параграфе 4.3 с учетом явлений диффузии и конвекции исследована задача кольматационно-суффозионной аномальной фильтрации дисперсных систем в двумерной пористой среде, состоящей из двух зон с движущимися и неподвижными флюидами. Аномальная фильтрация и перенос вещества описывается дифференциальными уравнениями с дробными производными. Решена соответствующая задача и оценены различные характеристики фильтрации, пористости и переноса частиц.

В отдельном параграфе исследуется задача фильтрации в пористой среде с подвижной и малоподвижной жидкостью.

Жидкость движется в направлениях x и y в области R^+ . В R^- области также происходит конвективно-диффузионный, кольматационно-суффозионный перенос вещества. С учетом вышеуказанного, процесс переноса вещества в R^+ и R^- можно описать уравнениями

$$\varepsilon_{0r} \frac{\partial c_r}{\partial t} = \varepsilon_{0r} \left\{ D_{rx} \frac{\partial^{\beta_{rx}} c_r}{\partial x^{\beta_{rx}}} + D_{ry} \frac{\partial^{\beta_{ry}} c_r}{\partial y^{\beta_{ry}}} \right\} - \frac{\partial(v_{rx} c_r)}{\partial x} - \frac{\partial(v_{ry} c_r)}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t}, \quad r = 1, 2, \quad (31)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = \omega_1 (\varepsilon_{0r} - \varepsilon_r) |\nabla p_r| - \omega_2 \varepsilon_r c_r, \quad r = 1, 2, \quad (32)$$

где c_r – объемные концентрации твердых частиц в жидкости, ε_{0r} , ε_r – первоначальные и текущие пористости, ω_1, ω_2 – коэффициенты, характеризующие интенсивность суффозии и кольматации пор, $|\nabla p_r|$ – модули градиента давлений p_r , здесь $r = 1$ соответствует R^+ , а $r = 2$ – R^- .

Компоненты скорости фильтрации в R^+ и R^- определяются как

$$v_{rx} = - \frac{k_{rx}(\varepsilon_r)}{\mu} \frac{\partial^{\gamma_1} p_r}{\partial x^{\gamma_1}}, \quad v_{ry} = - \frac{k_{ry}(\varepsilon_r)}{\mu} \frac{\partial^{\gamma_2} p_r}{\partial y^{\gamma_2}}, \quad r = 1, 2, \quad (33)$$

где $k_r(\varepsilon_r)$ – коэффициенты проницаемости областей R^+ и R^- , которые за счет кольматационно-суффозионных эффектов являются функциями ε_r .

Модуль градиента давления определяется из следующих соотношений

$$|\nabla p_r| = \sqrt{\left(\frac{\partial p_r}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p_r}{\partial y} \right)^2}, \quad r = 1, 2. \quad (34)$$

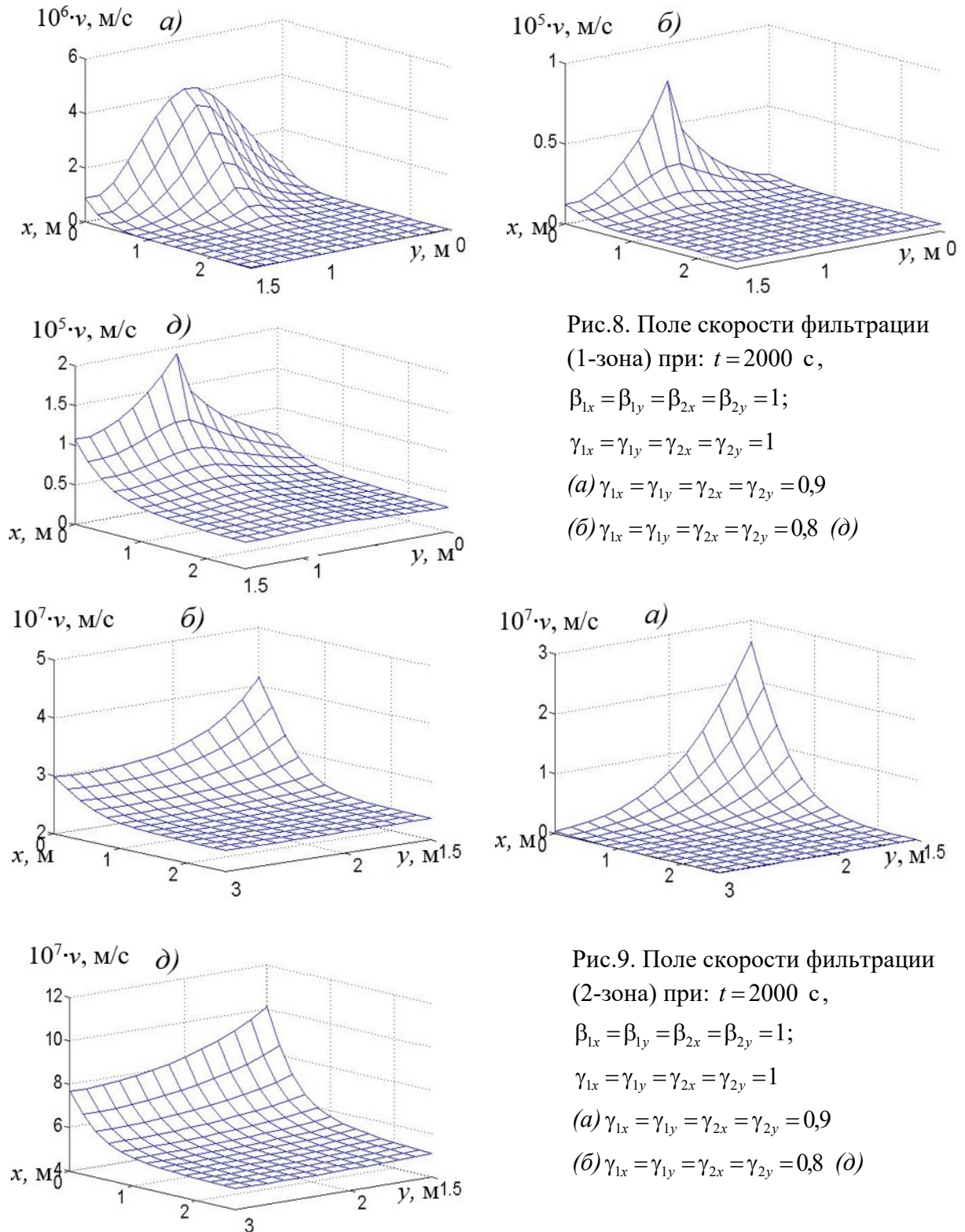
Уравнения пьезопроводности в R^+ и R^- определяются как

$$\frac{\partial p_r}{\partial t} = \chi_{rx}^*(p_r) \frac{\partial^{\gamma_{rx}+1} p_1}{\partial x^{\gamma_{rx}+1}} + \chi_{ry}^*(p_r) \frac{\partial^{\gamma_{ry}+1} p_r}{\partial y^{\gamma_{ry}+1}},$$

$$\chi_{rx}^*(p_r) = \chi_{rx}(\epsilon_{0r} + \beta_r^*(p_r - p_0)) \cdot \chi_{ry}^*(p_r) = \chi_{ry}(\epsilon_{0r} + \beta_r^*(p_r - p_0)). \quad r = 1, 2. \quad (35)$$

Итак, получаем систему уравнений кольматационно-суффозионного переноса вещества в зонах R^+ и R^- , состоящую из уравнений баланса (31), уравнений кинетики (32), аномальных законов Дарси (33) и уравнений пьезопроводности (35).

Задачи решаются методом конечных разностей. На основе численных



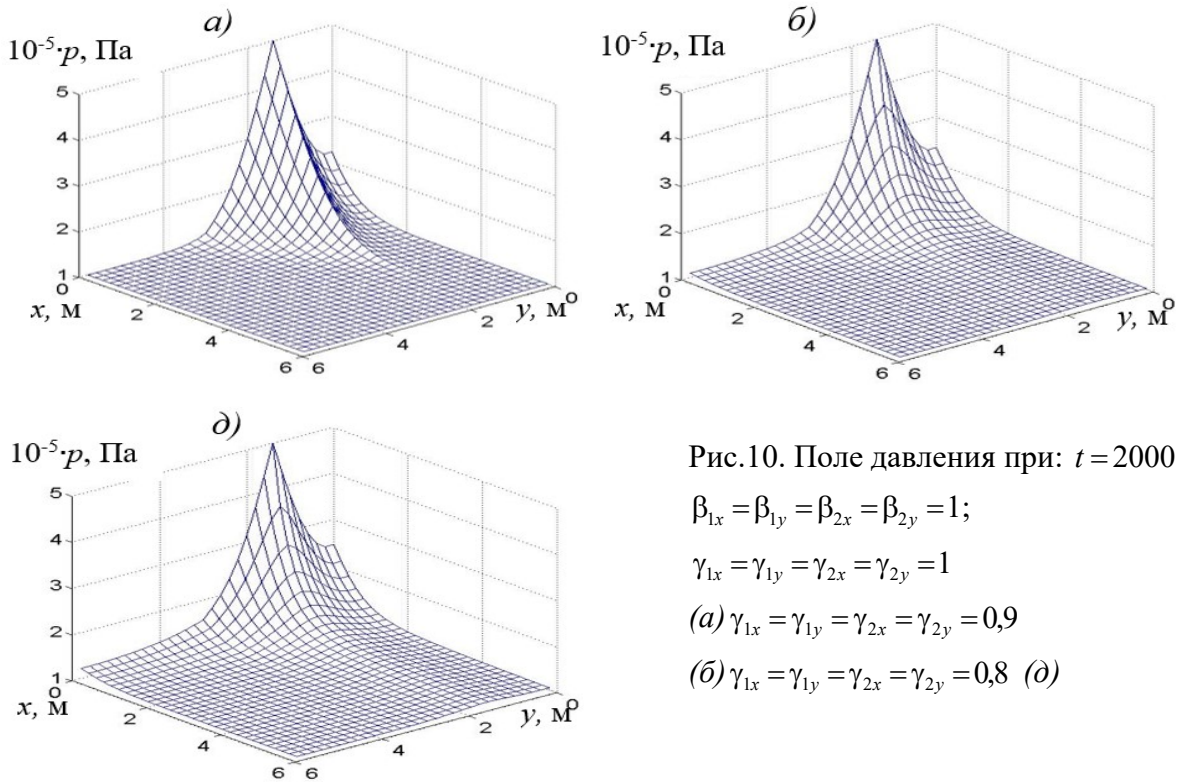


Рис.10. Поле давления при: $t = 2000$ с,
 $\beta_{1x} = \beta_{1y} = \beta_{2x} = \beta_{2y} = 1$;
 $\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 1$
 (а) $\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 0,9$
 (б) $\gamma_{1x} = \gamma_{1y} = \gamma_{2x} = \gamma_{2y} = 0,8$ (д)

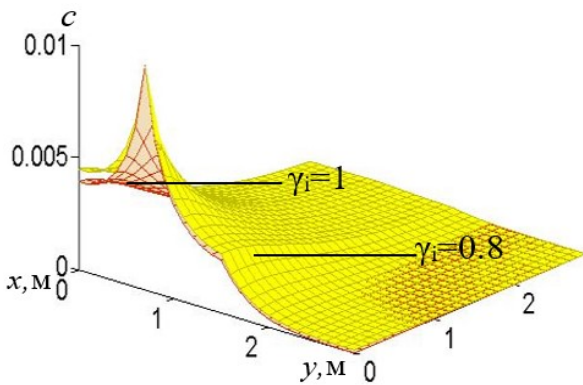


Рис.11. Поле концентрации при:
 $t = 10000$ с, $\beta_{1x} = \beta_{1y} = \beta_{2x} = \beta_{2y} = 2$

результатов определены профили концентрации, градиента давления, пористости и скорости фильтрации. На рис. 8–10 показано профили давления и скорости фильтрации. Полученные результаты показывают, что уменьшение значения γ_{rx} и γ_{ry} от 1 приводит к увеличению влияния давления на скорость фильтрации в обеих зонах. Концентрационное поле приведено на рис.11. Если понизить порядок производной скорости фильтрации γ_{rx} и γ_{ry} от 1, то можно увидеть более широкий разброс концентрационных полей в обеих зонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрен перенос и фильтрация суспензий в одномерной пористой среде с фрактальной структурой. На основе аномального закона Дарси, усовершенствованы математические модели процессов переноса веществ и фильтрации в неоднородных пористых средах. Результаты расчета

показывают, что уменьшение порядка производной в уравнении фильтрации от 1 привело к увеличению давления и скорости фильтрации. Показано, что понижение порядка производной диффузионного члена от 2 приводит к «ускорению» процесса диффузии и более широкому распространения профилей концентрации.

2. Рассмотрена задача массопереноса в двумерной пористой среде с фрактальной структурой. Перенос вещества в такой среде описывался уравнением дробной производной по времени и координате. На основе численного решения уравнения при соответствующих начальных и граничных условиях показано, что уменьшение порядка дробной производной от 2 приводит к ускорению процесса диффузии, т. е. возникает процесс «быстрой диффузии».

3. Численно анализирована и решена задача переноса вещества и фильтрации в двухзонной фрактальной среде. Показано, что уменьшение порядка производной от 2 в диффузии, «ускоряет» процесс диффузии. Было замечено, что уменьшение порядка производной по диффузионному члену в R^- зоне от 2 влияет только на характеристики переноса в R^+ зоне, тогда как уменьшение порядка производной диффузии в зоне от 2 влияет на характеристики переноса в обеих зонах.

4. Определен относительный расход вещества через общую границу зон. Показано что, уменьшение порядка производной в диффузионном члене уравнения переноса в R^+ от 2 приводит к увеличению относительного расхода вещества через общую границу зон.

5. Усовершенствована математическая модель кольматационно-супердиффузионного фильтрации в пористой среде с фрактальной структурой, состоящей из движущихся и медленно движущихся зон жидкости. На общей границе подвижной и малоподвижной областей происходит конвективно-диффузионный перенос вещества, при этом показано, что в области движущейся жидкости сильное влияние оказывают концентрация вещества, пористость среды и давление. На основе численных результатов определены концентрация взвешенных частиц, пористость среды, скорость фильтрации и поля давления. Проанализировано влияние процедур дробной производной и параметров модели на фильтрационные свойства среды. Результаты расчетов показывают, что уменьшение порядка производной в уравнении фильтрации от 1 приводит к тому, что движение взвешенных частиц распространяются на большие расстояния.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 UNDER SAMARKAND STATE
UNIVERSITY NAMED AFTER SHARAF RASHIDOV**

**SAMARKAND STATE UNIVERSITY NAMED AFTER SHARAF
RASHIDOV**

KULJANOV JAKHONGIR BAKHTIYOROVICH

**PROBLEMS OF ANOMALOUS FILTRATION OF FLUIDS IN
INHOMOGENEOUS POROUS MEDIUM**

01.02.05 – Fluid and gas mechanics

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

Samarkand-2024

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2022.4.PhD/FM799.

The dissertation has been prepared at Samarkand State University named after Sharaf Rashidov. The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (www.samdu.uz) and the “Ziyonet” Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Makhmudov Jamol Makhmud ugli**
Doctor of physical and mathematical sciences

Official opponents: **Burnashev Vladimir Fidratovich**
Doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher

Khudaykulov Savet Ishonkulovich
doctor of technical sciences, professor

Leading organization: **Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T.Urazbaev Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan**

Defense will take place « ____ » _____ 2024 at ____ at the meeting of Scientific Council number DSc.03/30.12.2019.FM/T.02.09 at Samarkand State University named after Sharaf Rashidov. (Address: University str. 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, tel.: (+99866) 239-11-40, fax: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: devonxona@samdu.uz).

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

Abstract of dissertation sent out on « ____ » _____ 2024 year
(Mailing report № _____ on « ____ » _____ 2024 year)

R. I. Khalmuradov
Chairman of scientific council
on award of scientific degrees,
Doctor of technical sciences, Professor

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

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

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the work development of mathematical models of anomalous filtration and suspensions transfer in an inhomogeneous porous medium with a fractal structure based on Darcy's anomalous law and Fick's anomalous law.

The object of research work is a one- and two-zone porous medium with a fractal structure.

Scientific novelty of the dissertation research is as follows:

the mathematical model of the filtration process of suspensions in heterogeneous porous media was improved taking into account the anomaly of the filtration process and the fact that the porous medium has a fractal structure, and a calculation algorithm was developed for solving problems in one- and two-dimensional cases by the finite difference method;

the mathematical model of the process of filtration and solute transport in a two-zone porous medium was improved taking into account the fractional Darcy's and Fick's laws, the retardation factor during the filtration process, and the influence of the fractional derivative order on the filtration characteristics was evaluated;

taking into account the anomalous nature of the filtration process in heterogeneous porous media, the piezo-conductivity equation was improved, and the current, total, and total relative flow of matter passing through the common boundary of two-zone media at different values of the order of the fractional derivative was determined;

the mathematical model of nonhomogeneous fluid filtration in a two-zone porous medium was improved taking into account pore colmotation and suffosion, and a calculation algorithm was developed to solve the problems.

Implementation of research results.

Based on effective computational algorithms and software products for the numerical study of improved mathematical models of anomalous filtration of inhomogeneous fluids in porous media with a fractal structure:

based on diffusion and convection phenomena, improved mathematical models of the process of anomalous filtration of fluids in heterogeneous porous media, a developed calculation algorithm, and numerical analysis of models of colmotation-suffosion anomalous filtration consisting of two zones with mobile and immobile fluids of dispersed systems in a porous medium programs were used by the Sirdarya-Zarafshon Irrigation Systems Basin Administration of the Jizzakh region in order to estimate the distribution field of various harmful substances that flowed in with the water during the filling of the reservoir with water, and to reduce the time and labor required to implement engineering calculations (Republic of Uzbekistan Certificate No. 03/37-2604 of the Ministry of Water Management dated August 16, 2023).

In the water reservoir, the process of sludge settling to the bottom of the dam and reservoir was evaluated, and the determination of the distribution field of various mechanical particles that flowed into the reservoir made it possible to increase the accuracy of engineering work by 7-8%;

Taking into account the fact that the layers have a fractal structure in irrigation problems, the role of colmotation-suffosion phenomena in the process of solute transport was evaluated on the basis of the algorithm and program for the numerical solution of the filtration problem. This made it possible to reduce the time and labor required for the transfer of engineering calculations

Publication of research results. 18 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, of which 7 are included in the list of scientific publications proposed by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the results of dissertation works, including 4 published in foreign and 3 in republican scientific journals, and a certificate of registration of software was received product for computers (No. DGU 21966).

The structure and volume of the thesis. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. The volume of the dissertation is 109 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Махмудов Ж.М., Усмонов А.И., Кулжонов Ж.Б. Математическое моделирование задачи переноса вещества в двумерной неоднородной среде // Научный вестник СамГУ, 2021. № 5. С. 96-105. (01.00.00. №2)

2. Makhmudov J.M., Usmonov A.I. and Kuljanov J.B. The problem of filtration and solute transport in a two-zone porous medium // AIP Conference Proceedings 2637, 040020 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0118492>. (№ 3 Scopus, IF=0.189).

3. Makhmudov J.M., Sulaymonov F.U., Usmanov A.I., Kuljanov J.B. The Problem of Anomalous Filtration and Solute Transport in an Inhomogeneous porous Medium // Eurasian Journal of Physics, Chemistry and Mathematics. Volume 15. February 2023. Belgium. Pp 64-73. ISSN:2795-7667. (IF=7.825).

4. Makhmudov J.M., Usmonov A.I., Kuljanov J.B. Problem of anomalous filtration in nonhomogeneous porous medium // International Journal of Applied Mathematics, 2023. Volume 36. No. 2. Pp. 189-203. (№ 3 Scopus, Q3).

5. Makhmudov J.M., Usmonov A.I., Kuljanov J.B. Solution of the Anomalous Filtration Problem in Two-Dimensional Porous Media // APAMCS 2022, LNNS 702, Pp. 68–80, 2023 https://doi.org/10.1007/978-3-031-34127-4_7. (№ 3 Scopus).

6. Махмудов Ж.М., Усмонов А.И., Кулжанов Ж.Б. Математическое моделирование процесса аномальной фильтрации суспензии в пористой среде с фрактальной структурой // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2023. – №4(51). – С. 5-13. (01.00.00. №9).

7. Усмонов А.И., Кулжанов Ж.Б., Сулайманов Ф.У. Задача аномальной фильтрации неоднородной жидкости в двумерной области // Узбекский журнал «Проблемы механики», 2023. №3. – С. 71-80. (01.00.00. №4).

II бўлим (II часть; II part)

8. Махмудов Ж.М., Кулжанов Ж.Б., Исанов О. Задача фильтрации и переноса вещества в пористой среде с фрактальной структурой // Амалий математика ва ахборот технологияларининг замонавий муаммолари. Бухоро, 11-12 май 2022 йил. С.334-335.

9. Кулжанов Ж.Б., Исанов О. Численное решение задачи кольматационно-суффозионной фильтрации суспензии в пористой среде с фрактальной структурой // International scientific-online conference. Part 6, 23.05.2022 Pp. 364-365 <https://doi.org/10.5281/zenodo.6574495>.

10. Makhmudov J.M., Usmonov A.I., Kuljanov J.B. The problem of anomalous filtration and solute transport in an inhomogeneous porous medium // Computational models and technologies. September 16-17th, 2022 Tashkent Pp. 120-121.

11. Махмудов Ж.М., Усмонов А.И., Кулжонов Ж.Б. Численное решение задачи аномальной фильтрации и переноса вещества в пористой среде // International conference mathematical analysis and its applications in modern mathematical physics. September 23-24, 2022; Samarkand, Uzbekistan Pp.205-206.

12. Махмудов Ж.М., Усмонов А.И., Кулжонов Ж.Б. Численное решение задачи аномальной фильтрации суспензии в пористой среде с фрактальной структурой // Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. Самарканд, 26-27 октября 2022 г С.251-256.

13. Махмудов Ж.М., Кулжонов Ж.Б., Шодиев.С. Задачи аномальной фильтрации с полосаобразным источником // Термиз. 18-19 ноября 2022 года. С.281-283.

14. Махмудов Ж.М., Кулжонов Ж.Б., Микиева Г.С. Численное решение задачи аномальной фильтрации суспензии в пористой среде с учетом кольтатации и суффозии // Mathematics, mechanics and intellectual technologies. 28-29 March, Tashkent-2023 С.132-133.

15. Махмудов Ж.М., Кулжонов Ж.Б., Усмонов А. “Ғовак муҳитларда суюкликларнинг аномал сизиши масаласини сонли тадқиқ этиш” дастур гувоҳномаси. № DGU 21966. Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлиги. 23.01.2023й.

16. Махмудов Ж.М., Усмонов А.И., Кулжонов Ж.Б., Микиева Г.С. Численное решение задачи аномальной фильтрации в неоднородных пористых средах // Международная научно-практическая конференция «Рахматулинские чтения» 26 –27 мая Ташкент-2023 С.102-103.

17. Makhmudov J.M., Usmonov A.I., Kuljanov J.B., Zokirov M.S. Numerical solution of the anomalous filtration problem in an inhomogeneous porous medium // Modern problems of Mathematics and Mechanics. Baku, 26-28 April 2023. Pp. 266-268.

18. Makhmudov J.M., Usmonov A.I., Kuljanov J.B. Numerical solution of anomalous filtration problem in a porous medium // VII world Congress of Turkic World Mathematicians. September 20–23, 2023, Turkestan, Kazakhstan Pp.362.

19. Makhmudov J.M., Usmonov A.I., Kuljanov J.B. Numerical solution of the problem of anomalous filtration of a suspension in a porous medium with a fractal structure // International Scientific Conference: Al-Khwarizmi September 20–23, 2023, Samarkand. Pp.66.

Aftoreferat Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universitetining
“SamDU ilmiy tadqiqotlar axborotnomasi” jurnali tahririyatida
tahrirdan o‘tkazildi (24.06.2024-yil).

2024-yil 24-iyun bosishga ruxsat etildi:
Ofset bosma qog‘oz. Qog‘oz bichimi 60×84 ¹/₁₆.
“Times” garnituras. Ofset bosma usuli.
Shartli b.t. 2,75. Adadi 80 nusxa. Buyurtma № 6/2.

“Sardor poligraf” OK bosmaxonasida chop etildi.
Manzil: Samarqand viloyati, Samarqand tumani, Xishrav MFY.

