

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

---

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**СУЛАЙМОНОВ ФОЗИЛ ЎРАЛОВИЧ**

**АГРЕГАТЛАНГАН ҒОВАК МУҲИТЛАРДА МОДДА КЎЧИШИНИНГ**  
**ГИДРОДИНАМИК МАСАЛАЛАРИ**

**01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси**

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

**Самарқанд – 2019**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)**

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

**Сулаймонов Фозил Ўралович**

Агрегатланган ғовак муҳитларда модда кўчишининг гидродинамик масалалари ..... 3

**Сулаймонов Фозил Уралович**

Гидродинамические задачи переноса вещества в агрегированных пористых средах .....21

**Sulaymonov Fozil Uralovich**

Hydrodynamic problems for mass transport in aggregated porous media.....39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works .....43

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

---

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**СУЛАЙМОНОВ ФОЗИЛ ӢРАЛОВИЧ**

**АГРЕГАТЛАНГАН ҒОВАК МУҲИТЛАРДА МОДДА КӢЧИШИНИНГ**  
**ГИДРОДИНАМИК МАСАЛАЛАРИ**

**01.02.05 – Суюклик ва газ механикаси**

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

**Самарқанд–2019**

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.3.PhD/FM126 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Самарқанд Давлат университетида бажарилган.

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

**Илмий раҳбар:** Хўжаёров Бахтиёр Хўжаёрович  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** Маликов Зафар Мамяткулович  
техника фанлари доктори  
Джабборов Мамасоль Содиқович  
физика-математика фанлари номзоди, доцент


**Етакчи ташкилот:** Тошкент ахборот технологиялари университети  
ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий  
инновацион марказ


Диссертация химояси Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.30.08.2018.FM/T.02.09 рақамли Илмий кенгашининг «17» май 2019 йил соат 11<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтди. (Манзил: 140104, Самарқанд ш., Университет хиббони, 15-уй. Тел.: (+99866) 239-11-40, факс: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: [devonxona@samdu.uz](mailto:devonxona@samdu.uz)).


Диссертация билан Самарқанд давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (27 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 140104, Самарқанд ш., Университет хиббони, 15-уй. Тел.: (+99866) 239-17-25.

Диссертация автореферати 2019 йил «3» май кuni тарқатилди.  
(2019 йил «3» май даги 3 рақамли реестр баённомаси).



  
**Р.Н.Халмуратов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси,  
техника фанлари доктори, профессор

  
**А.Абдирашидов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби,  
физика-математика фанлари доктори, доцент

  
**Ж.А.Акилов**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий  
семинар раиси ўринбосари,  
физика-математика фанлари доктори, профессор

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда биржинслимас муҳитларда модда кўчиши масаласини ўрганиш техниканинг турли соҳаларига, хусусан, зарарли моддаларни ер остига утилизация қилиш, атроф муҳитни муҳофаза қилиш, нефть ва газ қазиб чиқариш ва бошқа масалаларга катта эътибор қаратилмоқда. Сув билан бирга ер остига ҳайдалган зарарли модда қатлам ўтказувчанлиги юқори бўлган каналдан, қатлам орасидан, резервуарнинг ғоваги орқали ҳаракатланиб сезиларли даражада қатлам бўйлаб тарқалиши мумкин. Бунда резервуарнинг зарарли моддаларни сақлашдаги самарадорлигини баҳолаш муҳим аҳамият касб этмоқда. Шунинг учун кўпгина хорижий мамлакатларда, жумладан АҚШ, Англия, Франция, Хитой, Япония, Россия Федерацияси ва бошқа ривожланган давлатларда биржинслимас ғовак муҳитларда моддалар кўчишининг математик моделларини ва уларни тадқиқ этишнинг сонли алгоритмларини ишлаб чиқиш ҳамда замонавий ҳисоблаш дастурий воситаларини яратишга алоҳида эътибор қаратилган.

Жаҳонда сизиш кўрсаткичлари фарқ қилувчи макроскопик биржинслимас, хусусан агрегатланган ғовак муҳитларда модда кўчиши ва суюқлик ҳаракати жараёнларида ғовак муҳит скелети биржинслимаслиги таъсирини тадқиқ қилишга йўналтирилган илмий-тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу йўналишда, хусусан аниқ геометрияга эга бўлган агрегатланган ғовак муҳитларда турли аралашмали моддалар кўчиши ва биржинслимас суюқлик ҳаракатининг мураккаб жараёнларини тадқиқ қилиш, реал объектлар параметрларини аниқлашнинг математик модели ва ҳисоблаш алгоритминини ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Шу билан бирга диффузион ва кинетик ёндашувлардан фойдаланишнинг математик модели, самарали алгоритми ва дастурларини ишлаб чиқиш зарур ҳисобланмоқда.

Республикамизда амалиётга жорий этилаётган модда кўчиш масалалари тупроқ физикасида муҳим аҳамият касб этмоқда, хусусан пестицидлар, нитрадлар, оғир металллар ва бошқа моддаларнинг ғовак муҳитларда ҳаракатини тавсифлашда, атроф муҳит ҳимояси, нефть ва газларни қазиб олиш ва техниканинг бошқа соҳаларида кенг қўлланилмоқда. Бундай тадқиқотларда ғовак муҳит сизиш кўрсаткичлари (ғовакликлар ўлчамларининг тақсимланиши, агрегатланиш) ва кимёвий модданинг ғовак муҳитдаги (диффузия, дисперсия, анионларни йўқотиш, адсорбция ёки алмашинув жараёни) ҳолатини тадқиқ этиш чора-тадбирларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасининг янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...ишлаб чиқаришни жадал ривожлантиришга қаратилган сифат жиҳатидан янги босқичга ўтказиш..., ирригация объектлари тармоқларини ривожлантириш...»<sup>1</sup> вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан

---

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

биржинслимас ғовак муҳитларда моддалар кўчиши ва сизиши жараёнларини ифодаловчи такомиллаштирилган математик моделларни яратиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 25 сентябрдаги ПҚ-3286-сон «Сув объектларни муҳофаза қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора тадбирлари тўғрисида»ги, 2017 йил 30 июндаги ПҚ-3107-сон «Нефть ва газ саноатини бошқариш тизимини мукаммаллаштириш тўғрисида»ги, 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Охириги йилларда нефтгаз ва сув қатламларида сизиш ва кўчишнинг мураккаб динамик жараёнларининг математик моделларини яратиш ва такомиллаштириш ҳамда уларни сонли тадқиқ қилиш қуйидаги олимлар: J.Bear, Van Genuchten M.Th., Wierenga P.J., Coats, K.H., Smith, B.D., Rasmuson A., I. Neretnieks, N.W.Haws, J.L.Auriault, Green R. E., P.S.-C. Rao, J. C. Corey, F.N. Dalton, R.E.Jessup, Chen Ch.Sh., E.L.Cussler, J.M.Davidson, Drummond J. E, J.P.Gaudet, R.Haggerty, M.Hilpert, M.R.Paraskewich, Biggar J. W., D. R. Nielsen, Hashimoto I., Cameron D.R., Klute A, M.M.Rahman, P.Royer, H.M.Selim, G.Vachaud, Parker J.C., A.J.Valocchi, W.P.Ball, R.J.Wagenet, D.F.Young ва бошқаларнинг ишларида қаралган.

Ўзбекистонда ғовак муҳитларда суюқлик ва газ ҳаракатини жараёнларини бошқариш, башорат ва тадқиқ қилиш учун математик моделлар ва ҳисоблаш усулларини ишлаб чиқишга юртимиз олимларидан Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Ж.Ф.Файзуллаев, Н.М.Мухидинов, Р.Садуллаев, И.Алимов, Б.Х.Хужаёров, Ж.Акилов, Н.Равшанов, И.К.Хужаев, Ш.Каюмов, В.Ф.Бурнашев ва бошқалар муҳим ҳисса қўшган.

Бугунги кунда турли аниқ геометрияга эга бўлган агрегатланган ғовак муҳитларда модда кўчиши, адсорбцияланиш ҳодисаси, сизиш тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланиши масалаларини ечиш усули ва алгоритмларни ишлаб чиқишдаги муаммолар етарли даражада ўрганилмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Самарқанд давлат университетининг илмий тадқиқот ишлари режасининг №19.12 «Муҳандислик ва табиий жараёнларнинг математик моделларини тузиш ва сонли тадқиқ қилиш» (2000-2018) ҳамда №ФА-Ф1-Ф042 «Биржинслимас суюқликларнинг ғовак муҳитларда сизиши гидродинамик моделларини тузиш ва тадқиқ этиш» (2007-2011), №ФА-Ф078 «Ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликларни сузилиши ва сизишининг

гидродинамик масалалари» (2012-2016) мавзусидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** аниқ геометрияга эга бўлган агрегатланган ғовак муҳитларда адсорбция ходисаси ҳисобга олган ҳолда модда кўчиши ва коаксиал цилиндрик ғовак муҳитларда сизиш тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланишини ҳисобга олган ҳолда биржинслимас суюқлик сизиши жараёнларининг математик моделларини такомиллаштириш ҳамда сонли ечиш алгоритмларини ишлаб чиқишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

агрегатланган ғовак муҳитларда модда кўчиши ва суюқлик ҳаракатининг гидродинамик масалаларини ечиш усулларини ишлаб чиқиш;

коаксиал цилиндрик ғовак муҳитда модда кўчиши масаласини диффузион ва кинетик ёндашувлар асосида ечиш орқали иккала ёндашув натижаларини бир-бирига яқин келтирувчи масса кўчиш коэффициентининг қийматини аниқлаш;

марказида цилиндрик макропорали горизантал ўрнатилган цилиндрик ғовак муҳитда модда кўчиш масаласини адсорбцияланишни ҳисобга олиш ҳамда модда кўчишини иккита ҳол: диффузия ва кинетика ёндошувлар учун таҳлил қилиш;

сизиш тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланишида адсорбция ходисаларини ҳисобга олганда ва олмаганда цилиндрик ғовак муҳитда модда кўчиши ва сизиши масаласини сонли тадқиқ этиш;

диффузион ёндошувда асосида ечилган тўғри масала натижаларидан фойдаланиб, адсорбция ходисаларини ҳисобга олганда ва олмаганда кинетика тенгламасидаги масса кўчиш коэффициентини аниқлашнинг тесқари коэффициентли масаласини ечиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида марказида цилиндрик макроғовакли цилиндрик ғовак муҳит олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** математик моделлаштириш, ЭҲМда ҳисоблаш экспериментини ўтказиш учун самарали алгоритм ишлаб чиқиш, биржинслимас цилиндрик ғовак муҳитларда модда кўчиши ва суюқлик ҳаракатини гидродинамик таҳлил қилишдан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот жараёнида механиканинг фундаментал сақланиш қонунлари, қўшимча феноменологик фаразлар асосида чиқарилган биржинслимас цилиндрик ғовак муҳитларда модда кўчиши ва суюқлик ҳаракатининг гидродинамик тенгламалари, нозизиқли дифференциал тенгламаларни ечишнинг чекли айирмалар усулидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

диффузион ва кинетик ёндошувлар асосида биржинслимас цилиндрик ғовак муҳитда модда кўчиши масаласи ечилиб, масса кўчиш коэффициентининг шундай қиймати топилганки иккала ёндошув натижалари бир-бирига яқин келишлиги исботланган;

икки соҳали цилиндрик ғовак муҳитда суюқлик ҳаракати ва модда кўчиши адсорбция ҳисобга олинган ва олинмаган ҳоллар учун математик

модел сизиш тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланишини ҳисобга олиб такомиллаштирилган;

биржинслимас муҳитларда модда кўчиши ва суюқлик ҳаракати динамикалари, модда кўчиши, адсорбция ва агрегатланганлик хусусиятлари аниқланган;

тескари коэффицентли масаласини ечиш йўли билан диффузион ва кинетик ёндашув натижаларни бир-бирига яқин келтирувчи кинетика тенгламасидаги масса кўчиш коэффицентининг қиймати топилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижаси** қуйидагилардан иборат:

диффузион ва кинетик ёндошувлар асосида биржинслимас ғовак муҳитларда модда кўчишини ҳисоблаш схемаси ва алгоритми ишлаб чиқилган;

биржинслимас цилиндрик ғовак муҳитларда модда сизиши ва кўчишининг адсорбция ҳисобга олинган ва олинмаган ҳоллари учун математик модели ишлаб чиқилган;

биржинслимас цилиндрик ғовак муҳитда адсорбцияни ҳисобга олиб модда кўчишини ҳисоблаш учун дастурий восита ишлаб чиқилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.** Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги умумий маълум ва кўп маротаба текширилган ер ости гидро-динамикаси тенгламаларига асосланган бўлиб, сонли усулларни қўллашда уларнинг турғунлиги текширилганлиги, талаб қилинган аниқликдаги аппроксимациялардан фойдаланилганлиги, олинган натижалар физик жиҳатдан батафсил таҳлил қилинганлиги ва уларнинг реал физик жараёнларга мувофиқлиги ва мослиги баҳоланганлиги билан аниқланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти биржинслимас муҳитларда модда кўчиши моделларини такомиллаштириш, ишлаб чиқилган моделлар ва алгоритмлар асосида агрегатланган ғовак муҳитларда модда кўчиши ва сизиши назариясига ҳисса қўшиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти оқава ва ичимлик сувларини тозалаш жараёнларини таҳлил қилиш, нефт ва газ конларига иккиламчи ишлов бериш, гидрогеология каби соҳаларда биржинслимас муҳитлардаги модда кўчиши ва суюқлик ҳаракати жараёнларини сифат ва миқдор жиҳатдан баҳолашдан фойдаланилиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Биржинслимас ғовак муҳитларда модда кўчиши жараёнларининг такомиллаштирилган моделларини сонли тадқиқ этиш бўйича ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалари асосида:

муҳитда масса алмашинувини ҳисобга олиб биржинслимас ғовак муҳитда модда кўчиш моделининг сонли ечиш алгоритми ва дастурий воситаси “Сирдарё-Зарафшон” ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси тассарруфидаги Жиззах сув омборлари бошқармасига қарашли сув омборини сув билан тўлдириш, захирада сақлаш жараёнида лойқа босиши ҳажмини аниқлашда, омбор тубида чўкма ҳосил бўлиши ва қумлаш жараёнида асосий параметрлари ўзгариш оралиғини аниқлаш ишлари олиб боришда, сув билан бирга оқиб



кирган чўкинди ва ифлосланиш даражасини баҳолаш мақсадида жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Сув хўжалиги вазирлигининг 2018 йил 25 декабрдаги №03/20-2997-сон маълумотномаси). Натижада биржинслимас ғовак муҳитда модда кўчиши билан масса алмашинувини ҳисобга олиб ҳавзанинг тўлдирилиши, захира сувларининг сақланиши ва ишлатилишида инфильтрация жараёнларининг гидродинамик параметрларини баҳолаш ва ҳисоблаш аниқлигини 7-10% га ошириш имконини берган;

биржинслимас муҳитдан ташкил топган объектда масса алмашинувини ҳисобга олиб, биржинслимас ғовак муҳитда модда кўчиши моделининг сонли ечиш усули ва дастурий воситаси “Сирдарё-Зарафшон” ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси тассарруфидаги Жиззах сув омборлари бошқармасига қаршли сув омборига чўкманинг тўғон ва омбор тубини қолматациялаши ҳодисасини баҳолашга жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Сув хўжалиги вазирлигининг 2018 йил 25 декабрдаги №03/20-2997-сон маълумотномаси). Натижада сув омборида чўкманинг тўғон ва омбор тубини қолматациялаши ҳодисасини баҳолашда муҳандислик ҳисобларини ўтказишга кетадиган вақт ва меҳнат сарфини 10-15% га қисқартириш имконини берган;

сув омборининг қуйилиш қисмида ўзандаги лойқа чўкиндиларининг ўзан узунлиги бўйича тақсимланишини ва масса алмашинувини ҳисобга олиб, биржинслимас ғовак муҳитда модда кўчиш моделининг сонли ечиш усули ва дастурий воситаси “Сирдарё-Зарафшон” ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси тассарруфидаги Жиззах сув омборлари бошқармасига қаршли сув омбори қуйилиш қисмида ўзандаги лойқа чўкиндиларнинг ўзан узунлиги бўйича тақсимланишини ҳисоблашга жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси Сув хўжалиги вазирлигининг 2018 йил 25 декабрдаги №03/20-2997-сон маълумотномаси). Натижада сув омбори қуйилиш қисмида ўзандаги лойқа чўкиндиларнинг ўзан узунлиги бўйича тақсимланишини ҳисоблашларини ўтказишга кетадиган вақтни 5-7% га қисқартириш имконини берган;

“Адсорбцияни ҳисобга олиб биржинслимас цилиндрик ғовак муҳитда модда кўчишини ҳисоблаш” алгоритми ва дастурий таъминоти 92-2015-03 (A mobile irrigation system for greenhouse) хорижий илмий тадқиқот гранти доирасида сизиш жараёнида ўғитнинг тарқалишини тадқиқ қилиш ва моделлаштиришга жорий этилган (Малайзия, Нилай университети, 2018 йил 13 ноябрдаги маълумотнома). Натижада алгоритм ва дастурий таъминотнинг қўлланилиши ўғит концентрациясининг чизикли ва ночизикли кўчишида мувозанат ва номувозанат адсорбцияни ҳисобга олиб, дифференциал тенгламани сонли ечиш, концентрациянинг тарқалишини аниқлаш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари 6 та халқаро ва 10 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 22 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий Аттестация комиссиясининг диссертациялар асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 6 та мақола,

жумладан, 2 таси хорижий нашрларда ва 4 таси республика нашрларида чоп этилган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация кириш қисми, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан ташкил топган. Диссертациянинг ҳажми 105 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Макраскопик биржинслимас ғовак муҳитларда модда кўчиши ва суюқлик ҳаракати»** деб номланган биринчи бобда биржинслимас макраскопик ғовак муҳитларда модда кўчиши ва суюқликнинг ҳаракатланиш жараёнларини ўзида акс эттирувчи асосий моделлар қаралган ва моделларининг турли хилдаги геометрик шаклга эга бўлган ғовак муҳитлардаги таҳлили ўтказилган. Модда кўчиши жараёнига адсорбция ҳодисаси ва ҳаракатсиз суюқликлар зонасининг таъсири турли ҳолатлар учун кўриб чиқилган. Биржинслимас муҳитларда суюқликнинг ҳаракати модда кўчиши масалаларини сонли ечиб таҳлил қилинган.

1.1-параграфда биржинслимас муҳитда модда кўчиши моделлари ва суюқликларнинг ҳаракати масалаларини ечишда ўтказилган бир қанча тадқиқотлар, экспериментлар, улар эришган натижа ва хулосалар ҳақида маълумотлар келтирилган.

1.2-параграфда турли адсорбция ҳодисаларини ҳисобга олиб, биржинслимас ғовак муҳитларда модда кўчиши модда концентрациясига таъсири ўрганилган, биржинслимас ғовак муҳитларда суюқлик ҳаракати кинетик моделларининг математик ифодаси қаралган. Муҳитнинг юзасида модданинг адсорбцияланиши туфайли унинг эритмадаги концентрацияси пасаяди. Суюқ муҳитдан адсорбция жараёнида адсорбцияланган модда миқдори ва эритмадаги концентрация ўртасида мувозанат ҳосил бўлади.

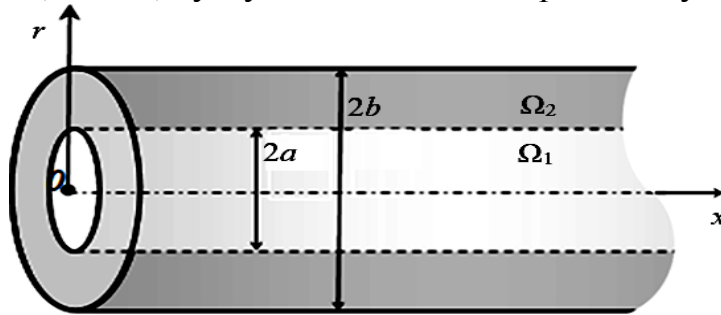
1.3-параграф ҳаракатсиз суюқлик соҳаси мавжуд бўлган муҳитда модда кўчишига бағишланган. Бундай соҳалар модда кўчиши жараёнига жиддий таъсир кўрсатади, чунки ҳаракатдаги суюқлик соҳасидан ҳаракатсиз суюқлик соҳасига диффузион модда кўчиши содир бўлади. Аниқ геометрияли макроскопик биржинслимас муҳитларда модда кўчишига доир мисоллар келтирилган.

1.4-параграфда макроскопик биржинслимас ғовак муҳитларда модда кўчиши моделларини сонли ечиш усуллари келтирилган.

Диссертациянинг «Биржинслимас цилиндрик муҳитда модда кўчиши» деб номланган иккинчи бобида марказида цилиндрик макроғовак ва уни ўраб турувчи цилиндрик микроғоваклардан ташкил топган икки қатламли цилиндрик ғовак муҳитда модда ҳаракати ва кўчиши масаласи қўйилган ва сонли ечилган.

2.1-параграфда диффузион ёндошув асосида марказида макроғовакли цилиндрик ғовак муҳитларда модда кўчиши масаласи ечилган.

Марказида цилиндрик макроғовак (ўтказувчанлиги юқори бўлган ғовак муҳит) жойлашган цилиндрик ғовак муҳит қаралган. (1-расм). Макроғовак цилиндрнинг радиуси  $a$  га ва уни ўраб турувчи микроғовак цилиндрик муҳитнинг радиуси  $b$  га тенг. Микроғовакнинг ғоваклиги ва ўтказувчанлиги кичик деб қаралган, демак, бу муҳитдаги модда ҳаракати жуда ҳам кам бўлади.



1-расм. Цилиндрик макроғовакли цилиндрик муҳит.

Қуйидаги боғлиқликлардан фойдаланамиз:

$$V_f = \frac{a^2}{b^2}, \quad V_a = 1 - V_f, \quad \theta_m = V_f \theta_f, \quad \theta_{im} = V_a \theta_a.$$

бу ерда  $V_f, V_a$  - макро ва микроғовакликларнинг муҳит ҳажмига нисбатан ҳажм бирлигидаги улуши;  $\theta_f, \theta_a$  - макро ва микроғовакликларнинг локал ғоваклик коэффициентлари;  $\theta_m, \theta_{im}$  - макро ва микроғовак муҳитларнинг нисбий ғоваклик коэффициентлари.

Макроғовакда модда кўчиши бир ўлчовли деб қаралади, бу эса ички цилинрнинг кўндаланг кесими бўйича ўртача коцентрация -  $c_m$  тушунчасини киритишга имкон беради.

Макроғовакда модда кўчиши масаласи бир ўлчамли қуйилганда ушбу тенглама билан ифодаланади

$$\theta_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m}{\partial x}, \quad (1)$$

бу ерда  $c_{im}$  - микроғовак муҳитдаги модданинг ўртача коцентрацияси

$$c_{im} = \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b r c_a(t, x, r) dr, \quad (2)$$

бу ерда  $D_m$  - гидродинамик дисперсия коэффициенти,  $v_m$  - макроғовакдаги модданинг ўртача тезлиги,  $c_a$  - ташқи цилиндрик муҳитдаги локал коцентрация,  $t$  - вақт,  $x$  - масофа.

$c_{im}$  микроғовак мухитдаги ўртачалашган концентрацияни ифодалайди. Мухитдаги модданинг тарқалиши оддий диффузия тенгламаси орқали қуйидагича ифодаланadi

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} = \frac{D_a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_a}{\partial r} \right), \quad a < r < b, \quad (3)$$

бу ерда  $D_a$  диффузия коэффициенти.

Сўнгра шу масалани кинетика тенгламаси асосида макроғовакдан микроғовак мухитга масса кўчиши масаласи қаралади

$$\theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \alpha (c_m - c_{im}), \quad (4)$$

яъни (2), (3) тенглама ўрнида масса кўчишининг кинетика тенгламасидан фойдаланилади. Бу ерда  $\alpha = \text{const}$  масса кўчиш коэффициенти.

(3) тенгламага макро ва микроғовак мухитларнинг чегараларида концентрациянинг узлуксизлигини таъминловчи кўшимча шартни киритамиз

$$c_a(t, x, a) = c_m(t, x). \quad (5)$$

Микроғовак мухитда бўйлама йўналиш бўйича тарқалиш ҳисобга олинмайди ва ( $r = b$ ) чегарада модда оқими йўқ, ўтказмас деб қаралади.

$$\frac{\partial c_a(t, x, b)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

$x = 0$  нуқтадан  $0 \leq r \leq a$  бутун макроғовак мухитнинг кўндаланг кесим юзаси бўйлаб,  $t > 0$  вақтдан бошлаб,  $c_0$  концентрацияли биржинслимас суюқлик  $v_m$  ўртacha ўзгармас тезликда мухитга юборилади. Бошланғич ва чегаравий шартлар қуйидагича:

$$c_m(0, x) = 0, \quad (7)$$

$$c_{im}(0, x) = 0, \quad (8)$$

$$c_a(0, x, r) = 0, \quad (9)$$

$$c_m(t, 0) = c_0, \quad c_0 = \text{const}, \quad (10)$$

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

(1) - (4) тенгламалар (5) - (11) бошланғич ва чегаравий шартлар асосида чекли айирмалар усулидан фойдаланиб ечилган.  $c_a$  - локал концентрация майдони аниқланган, бундан ташқари  $c_m$ ,  $c_{im}$  - концентрация профилларининг ўзгаришлари кўрсатилган. Иккала ёндошувларда натижаларни бир-бирига яқин келтирувчи масса кўчиш коэффициентининг ( $\alpha = 2.8 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) қиймати аниқланган.

2.2-параграфда 2.1-параграфдаги масала адсорбцияни ҳисобга олиб қаралган. Бунда кўчиш масаласи қуйидаги кўринишда бўлади

$$\theta_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \rho_m \frac{\partial s_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} + \rho_{im} \frac{\partial s_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m}{\partial x}, \quad (12)$$

$$s_{im} = \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b r s_a(x, r, t) dr, \quad (13)$$

$$\theta_a \frac{\partial c_a}{\partial t} + \rho_a \frac{\partial s_a}{\partial t} = \theta_a D_a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_a}{\partial r} \right), \quad a < r < b, \quad (14)$$

бунда  $s_m, s_{im}$  - модданинг макро ва микроғовак муҳитлардаги адсорбция концентрациялари,  $s_a$  - микроғовакдаги адсорбцияланган модданинг локал концентрацияси,  $\rho_m, \rho_{im}$  - макро ва микроғовак муҳитларнинг ҳажмий зичлиги.

Генри изотермасидан қуйидаги кўринишда фойдаланамиз

$$s_m = k_m c_m, \quad s_a = k_a c_a, \quad s_{im} = k_{im} c_{im}, \quad (15)$$

$k_m, k_{im}$  - модданинг макро ва микроғовакдаги адсорбция коэффициентлари.

(15) ни (12) ва (14) тенгламаларга қўйиб қуйидаги тенгламани ҳосил қиламиз

$$\theta_m R_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \theta_{im} R_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m}{\partial x}, \quad (16)$$

$$R_a \frac{\partial c_a}{\partial t} = D_a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_a}{\partial r} \right), \quad (17)$$

$R_m, R_{im}, R_a$  - ретардация коэффициентлари

$$R_m = 1 + \frac{\rho_m k_m}{\theta_m}, \quad R_{im} = 1 + \frac{\rho_{im} k_{im}}{\theta_{im}}, \quad R_a = 1 + \frac{\rho_a k_a}{\theta_a}.$$

(16), (17) масалалар чекли айирмалар усулида ечилади. Ҳаракатсиз суюқликли соҳадаги  $c_a$  - локал концентрация,  $s_a$  - локал адсорбция концентрация майдонлари аниқланган,  $c_m, c_{im}$  - концентрация профиллари ва  $s_m, s_{im}$  - адсорбцияланган модда концентрациясининг профиллари қурилган.

Сўнгра (16) тенгламани кинетика тенгламаси билан биргаликда ечилади, адсорбция ҳисобга олганда қуйидагича бўлади

$$\theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} + \rho_{im} \frac{\partial s_{im}}{\partial t} = \alpha (c_m - c_{im}). \quad (18)$$

Генри чизиқли изотермаси ҳолида (15)ни (18)га қўйиб қуйидагини ҳосил қиламиз

$$\theta_{im} R_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \alpha (c_m - c_{im}). \quad (19)$$

Икки ёндашув натижаларни бир-бирига яқин келтирувчи масса кўчиши коэффициентини  $\alpha$  ( $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ )нинг қиймати мувозанат адсорбцияни ҳисобга олган ҳолат учун аниқланган.

2.3-параграфда цилиндрик макроғовакли цилиндрик муҳитда номувозанат адсорбцияни ҳисобга олган ҳолда модда кўчиш масаласи қаралган. Бу ҳол учун адсорбциянинг кинетика тенгламаси қуйидаги кўринишда бўлади

$$\beta \frac{\partial s_m}{\partial t} = k c_m - s_m, \quad (20)$$

$$\beta \frac{\partial s_{im}}{\partial t} = kc_{im} - s_{im}, \quad (21)$$

$$\beta \frac{\partial s_a}{\partial t} = kc_a - s_a, \quad (22)$$

бу ерда  $\beta$  - номувозанат адсорбциядан муовзанатга характерли ўтиш вақти. Аввалги ҳолатлар натижалари билан бу ҳолат қиёсий таҳлил қилинган ва иккала ёндашув учун натижаларни бир-бирига яқин келтирувчи масса кўчиш коэффициенти  $\alpha$  ( $\alpha = 2.91 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ) аниқланган.

2.4-параграфда шу масала Фрейндлих изотермаси бўйича мувозанат адсорбциясини ҳисобга олган ҳол учун қаралган

$$s = kc^n, \quad 0 < n < 1. \quad (23)$$

Бу ҳолатда (16), (17) тенгламалардаги ретардацион коэффициентлар ўзгаради ҳолос

$$R_m = 1 + \frac{f_m \rho k n c_m^{n-1}}{\theta_m}, \quad (24)$$

$$R_{im} = 1 + \frac{(1 - f_m) \rho k n c_{im}^{n-1}}{\theta_{im}}, \quad (25)$$

$$R_a = 1 + \frac{f_a \rho k n c_a^{n-1}}{\theta_a}. \quad (26)$$

Шунингдек, масала кинетик тенглама (19) га асосан, (25) тенгликдан аниқланган ретардацион коэффициент  $R_{im}$  учун таҳлил қилинган. Фрейндлих изотермаси ва чизикли Генри изотермалари учун қиёсий таҳлиллар ўтказилган. Бундай ҳолатларда натижаларни бир-бирига яқин келтирувчи масса кўчиш коэффициенти  $\alpha = 3.64 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  аниқланган.

Сўнгра ночизикли кинетик адсорбция тенгламаси ҳисобга олган ҳол учун масала қуйидагича давом эттирилган

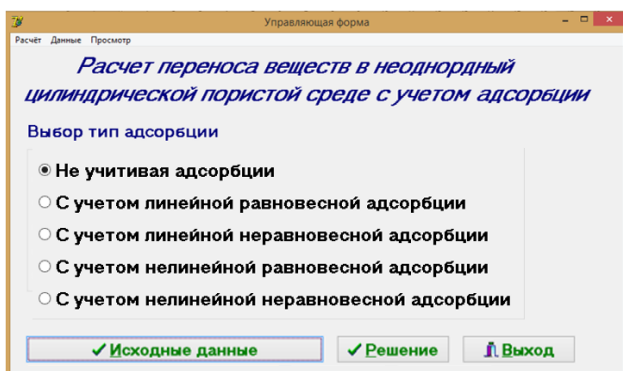
$$\beta \frac{\partial s_m}{\partial t} = kc_m^n - s_m, \quad (27)$$

$$\beta \frac{\partial s_{im}}{\partial t} = kc_{im}^n - s_{im}, \quad (28)$$

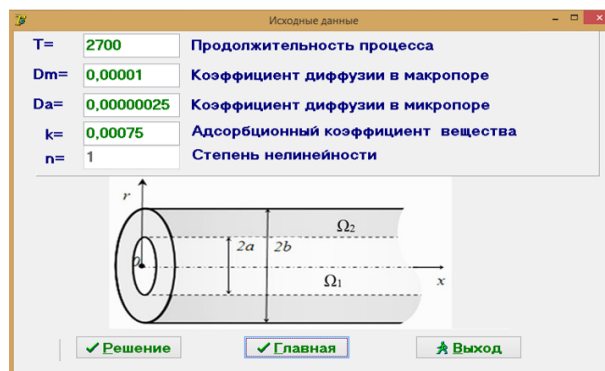
$$\beta \frac{\partial s_a}{\partial t} = kc_a^n - s_a. \quad (29)$$

Цилиндрик макроғовакли цилиндрик муҳитда модда кўчиш жараёнида турли хилдаги адсорбцияларнинг роли ҳамда, кўчиш жараёни хусусиятларига таъсирлари баҳоланган. Вақтнинг кичик қийматларида  $\alpha = 3.335 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  қиймати иккала ёндошувда яқин натижалари қайд қилинган.

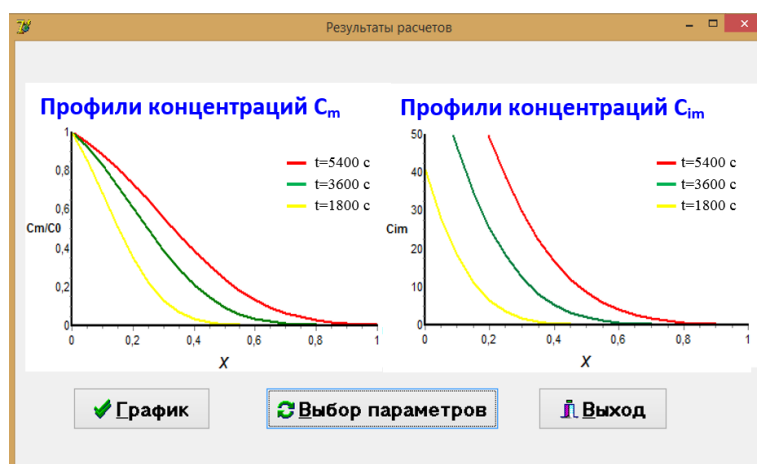
Цилиндрик макро ва микроғовак муҳитларда модда концентрациясини ҳисобловчи “Адсорбцияни ҳисобга олиб биржинслимас цилиндрик ғовак муҳитда модда кўчишини ҳисоблаш” номли дастурий мажмуа яратилган (2-4-расмлар).



2-расм. Бошқарувчи форма.



3-расм. Маълумотларни киритиши ойнаси.



4-расм. Натижаларни график кўринишида чиқариши ойнаси.

Дастур модда концентрация микдорларини адсорбцияни ҳисобга олган ва олмаган ҳолларда ҳисоблайди ва графикларини чизади. Дастур график интерфейс билан жиҳозланган, диалог режимида ишлайди, барча натижалар матнли файлда сақланади, бу уларни турли шаклларда қўллаш имконини беради.

Диссертациянинг «**Икки соҳали цилиндрик ғовак муҳитда сизиши тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланиш ҳисобга олганда суюқлик ҳаракати ва модданинг кўчиши**» деб номланган учинчи бобида икки соҳали ичма-ич жойлашган цилиндрик ғовак муҳитда модда кўчиши ва сизиши масаласи сизиш тезлик майдонининг биржинслимас тақсимланишни ҳисобга олганда қаралган.

3.1-параграфда аниқ геометрияга эга бўлган биржинслимас муҳитларда модда кўчишининг бирқанча назарий ва тажрибавий тадқиқотлари ҳақида маълумотлар келтирилган.

Маказида радиуси  $a$  га тенг бўлган цилиндрик макроғовак жойлашган радиуси  $b$  га тенг бўлган цилиндрик ғовак муҳит қаралади (1-расм). Шундай қилиб, масаланинг тадқиқоти бир-биридан сизиш хусусиятлари билан фарқ қилувчи иккита қисмдан иборат бўлади.  $(0,0)$  нуктадан ўзгармас  $p_c = \text{const}$  босимда муҳитга суюқлик юборилади. Дастлаб муҳитда  $p_0$  ўзгармас босим мавжуд эди,  $p_0 < p_c$ .

Ташқи цилиндрик мухит  $\Omega_2$  ўтказувчанлиги  $k_2$ , ички  $\Omega_1$  ники -  $k_1$ , бунда  $k_2 \ll k_1$ . Ташқи цилиндрик ғовак мухитнинг ташқи ён сирти ўтказмас.  $\Omega_1$  ва  $\Omega_2$  мухитлардаги сизиш тезликлари таркибий қисмлари Дарси қонуни асосида аниқланади

$$v_{1x} = -\frac{k_1}{\mu} \frac{\partial p_1}{\partial x}, \quad v_{1r} = -\frac{k_1}{\mu} \frac{\partial p_1}{\partial r}, \quad (r, x) \in \Omega_1, \quad (30)$$

$$v_{2x} = -\frac{k_2}{\mu} \frac{\partial p_2}{\partial x}, \quad v_{2r} = -\frac{k_2}{\mu} \frac{\partial p_2}{\partial r}, \quad (r, x) \in \Omega_2, \quad (31)$$

бунда  $p_1, p_2$  -  $\Omega_1, \Omega_2$  мухитлардаги босимлар,  $\mu$  - модданинг қовушоқлик коэффициентлари.  $\Omega_1, \Omega_2$  соҳалардаги босимларни аниқлаш учун пьезоўтказувчанлик тенгламасидан фойдаланамиз

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = \chi_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} \right\}, \quad (r, x) \in \Omega_1, \quad (32)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial t} = \chi_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p_2}{\partial x^2} \right\}, \quad (r, x) \in \Omega_2, \quad \chi_1 = \frac{k_1}{\mu \beta^*}, \quad \chi_2 = \frac{k_2}{\mu \beta^*}, \quad (33)$$

$\chi_1, \chi_2$  - пьезоўтказувчанлик коэффициентлари,  $\beta^*$  - мухитнинг эластик сиқилувчанлик коэффициенти ( $\beta^* = m\beta_{\text{жс}} + \beta_c$ ,  $\beta_{\text{жс}}$  - модданинг ҳажмий эластиклик коэффициенти ва  $\beta_c$  - эса мухитнинг ҳажмий эластиклик коэффициенти).

Бошланғич ва чегаравий шартлар қуйидагича:

$$p_1(0, r, x) = p_2(0, r, x) = p_0, \quad p_0 = \text{const}, \quad (34)$$

$$p_1(t, 0, 0) = p_c, \quad p_c = \text{const}, \quad p_c > p_0, \quad (35)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial x}(t, r, 0) = 0, \quad 0 < r \leq a, \quad (36)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial x}(t, r, \infty) = 0, \quad 0 < r \leq a, \quad (37)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial r}(t, 0, x) = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad (38)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial x}(t, r, 0) = 0, \quad a < r \leq b, \quad (39)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial x}(t, r, \infty) = 0, \quad a < r \leq b, \quad (40)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial r}(t, b, x) = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad (41)$$

$$k_1 \frac{\partial p_1}{\partial r}(t, a, x) = k_2 \frac{\partial p_2}{\partial r}(t, a, x), \quad 0 \leq x < \infty, \quad (42)$$

$$p_1(t, a, x) = p_2(t, a, x), \quad 0 \leq x < \infty. \quad (43)$$



(30) – (33) тенгнамалар системаси (34) – (43) бошланғич ва чегаравий шартлар билан чекли айирмалар усулида ечилган. Босим майдони, сизиш тезлиги иккала соҳада ҳам аниқланган.

3.2-параграфда икки соҳали цилиндрик муҳитда сизиш тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланишини ҳисобга олиб модда кўчиши ва ҳаракати масаласи қўйилган ва сонли ечилган. Икки соҳали цилиндрик муҳитда модда ҳаракати ва кўчиши масаласининг эластик режимдаги математик тенгнамаси қуйидагича:

$$\theta_1 \frac{\partial c_1}{\partial t} + v_{1x} \frac{\partial c_1}{\partial x} + v_{1r} \frac{\partial c_1}{\partial r} = \theta_1 D_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} \right\}, (r, x) \in \Omega_1, \quad (44)$$

$$\theta_2 \frac{\partial c_2}{\partial t} + v_{2x} \frac{\partial c_2}{\partial x} + v_{2r} \frac{\partial c_2}{\partial r} = \theta_2 D_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} \right\}, (r, x) \in \Omega_2, \quad (45)$$

$\theta_1$  ва  $\theta_2$  –  $\Omega_1$  ва  $\Omega_2$  соҳалардаги ғовакликлар;  $c_1, c_2$  – ҳажмий концентрациялар ва мос равишда  $D_1, D_2$  – диффузия коэффицентлари (бу ерда 1 - макроғовак, 2 - ташқи цилиндрик муҳит-микроғовак).

Масала чекли айирмалар усулидан фойдаланиб ечилган. (44), (45) тенгнамалардаги сизиш тезликлари компонентлари (30) - (43) масалалардан аниқланади. Босимнинг тарқалиши, сизиш тезлиги майдони ва икки соҳали цилиндрик ғовак муҳитда сизиш тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланишини ҳисобга олиб, модда концентрацияси аниқланган. Ўтказувчанликнинг муҳитда босимнинг тақсимланиши ва модда сизишида таъсири таҳлил қилинган.

3.3-параграфда юқоридаги масала чизикли мувозанат ва номувозанат адсорбцияларни ҳисобга олган ҳолда ечилган. Муҳитдаги суюқлик ҳаракати ва модда кўчиши адсорбцияни ҳисобга олган ҳолдаги математик тенгнамаси қуйидаги кўринишда бўлади:

$$\theta_1 \frac{\partial c_1}{\partial t} + v_{1x} \frac{\partial c_1}{\partial x} + v_{1r} \frac{\partial c_1}{\partial r} + \rho_1 \frac{\partial s_1}{\partial t} = \theta_1 D_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} \right\}, (r, x) \in \Omega_1, \quad (46)$$

$$\theta_2 \frac{\partial c_2}{\partial t} + v_{2x} \frac{\partial c_2}{\partial x} + v_{2r} \frac{\partial c_2}{\partial r} + \rho_2 \frac{\partial s_2}{\partial t} = \theta_2 D_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} \right\}, (r, x) \in \Omega_2, \quad (47)$$

$s_1, s_2$  – адсорбцияланган модданинг концентрацияси,  $\rho_1, \rho_2$  – макроғовак ва микроғовак муҳитлар зичлиги.

Адсорбциянинг турига қараб иккита ҳол қаралади:

а) Чизикли мувозанат адсорбция.

Бу ҳолда Генри изотермасидан қуйидаги кўринишда фойдаланамиз

$$s_1 = k_1^* c_1, \quad s_2 = k_2^* c_2, \quad (48)$$

$k_1^*, k_2^*$  - модданинг муҳитлардаги адсорбцияланиш коэффицентлари.

б) Чизикли номувозанат адсорбция. Бу ҳолда адсорбциянинг кинетик тенгнамаси қуйидаги кўринишда бўлади

$$\frac{\partial s_1}{\partial t} = \frac{k_1'}{\rho_1} c_1 - k_1'' s_1, \quad \frac{\partial s_2}{\partial t} = \frac{k_2'}{\rho_2} c_2 - k_2'' s_2, \quad (49)$$

бунда  $k_1', k_1'', k_2', k_2''$  - ўзгармаслар.

$\Omega_1$  ва  $\Omega_2$  соҳалардаги нисбий концентрация ва босим майдонлари аниқланган.

3.4-параграфда икки зонали цилиндрик муҳитда модда кўчиши масаласи биржинслимас сизиш тезлиги майдонининг тақсимланишини ва ночизикли адсорбцияни ҳисобга олган ҳолда ечилган.

а) Ночизикли мувозанат адсорбция. Масала ночизикли мувозанат адсорбция Фрейндлих изотермаси асосида ечилган

$$s_1 = k_1^* c_1^n, \quad s_2 = k_2^* c_2^n, \quad 0 < n < 1. \quad (50)$$

Бу ҳолатда (46), (47) тенгламалар (50) тенгликни ҳисобга олганда қуйидаги кўринишда бўлади

$$\left(\theta_1 + \rho_1 k_1^* n c_1^{n-1}\right) \frac{\partial c_1}{\partial t} + v_{1x} \frac{\partial c_1}{\partial x} + v_{1r} \frac{\partial c_1}{\partial r} = \theta_1 D_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} \right\}, \quad (r, x) \in \Omega_1, \quad (51)$$

$$\left(\theta_2 + \rho_2 k_2^* n c_2^{n-1}\right) \frac{\partial c_2}{\partial t} + v_{2x} \frac{\partial c_2}{\partial x} + v_{2r} \frac{\partial c_2}{\partial r} = \theta_2 D_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} \right\}, \quad (r, x) \in \Omega_2. \quad (52)$$

б) Ночизикли номувозанат адсорбция. Бу ҳолда адсорбциянинг ночизикли кинетик тенгламасидан фойдаланилади

$$\frac{\partial s_1}{\partial t} = \frac{k_1'}{\rho_1} c_1^n - k_1'' s_1, \quad \frac{\partial s_2}{\partial t} = \frac{k_2'}{\rho_2} c_2^n - k_2'' s_2. \quad (53)$$

Бу ҳол учун ҳам нисбий концентрация, босим майдонлари ва модда адсорбцияси концентрацияси ҳар иккала соҳаларда аниқланди. Ночизикли мувозанат ва номувозанат адсорбцияларни ҳисобга олган ҳолдаги натижалар аввалги ҳолатлар билан қиёсланиб таҳлил қилинган.

Диссертациянинг «**Биржинслимас ғовак муҳитларда модда кўчишида параметрларни идентификациялаш**» деб номланган тўртинчи бобида модда кўчиш масаласида масса кўчиш коэффицентини аниқлашнинг тескари масаласи адсорбцияни ҳисобга олмаган ва олган ҳолларда тадқиқ қилинган.

4.1-параграфда тескари масалалар ва уларнинг турлари ҳақида умумий, хусусан биржинслимас муҳитларда модда кўчиши параметрларни идентификациялаш ҳақида маълумотлар келтирилган.

4.2-параграфда икки соҳали цилиндрик ғовак муҳитдаги модда кўчиш масаласида масса кўчиш коэффицентининг қийматини аниқлашнинг тескари масаласи ечилган. Масса кўчиш коэффицентининг қийматини аниқлашда диффузион ёндошув асосида олинган қатлам нуқталари қийматлари натижаларига таянамиз. Тескари масалани ечишда бошланғич маълумотлар сифатида тўғри масалада ечиб олинган қатлам нуқталари қийматлардан фойдаланилган.

$$c_m(t, x_k) = z_k(t), \quad t \in [0, T], \quad k = 1, 2, 3. \quad (54)$$

Қатламнинг  $x = x_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) нуқталаридаги модда концентрацияси маълум  $z_k(t)$  вақт функциясининг қийматлари бўлади (5-расм).  $\alpha$  коэффициентни қуйидаги функционалнинг минимум шартидан қидирамиз

$$J(\alpha) = \sum_{k=1}^3 \int_0^T [c_m(t, x_k) - z_k(t)]^2 dt. \quad (55)$$

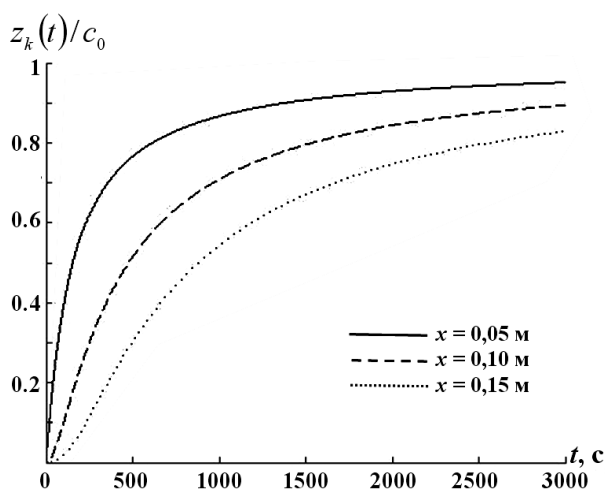
(1), (4) тенгламалар  $\alpha = \alpha^s$  бўлганда қуйидагича бўлади

$$\theta_m \frac{\partial c_m^s}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial c_{im}^s}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m^s}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m^s}{\partial x}, \quad (56)$$

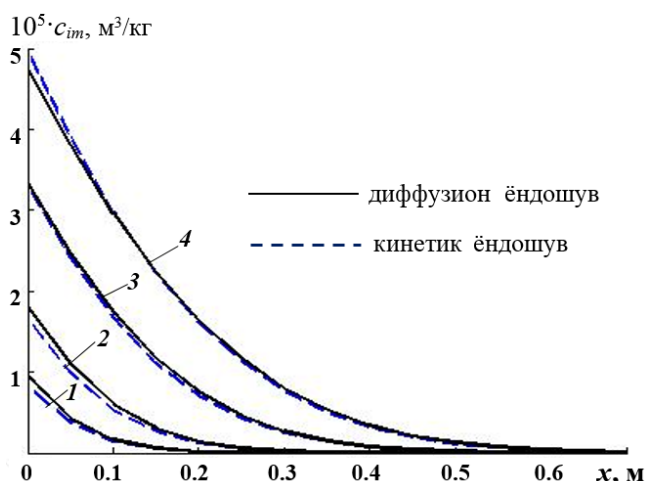
$$\theta_{im} \frac{\partial c_{im}^s}{\partial t} = \alpha^s (c_m^s - c_{im}^s) \quad (57)$$

(55) тенгликдан  $\alpha$  коэффициентни аниқлаш учун Matlab.7.6.0 (R2008a) муҳитида дастур тузилган. Тескари масаладан топилган масса кўчиш коэффициенти қиймати кўйилиб, кинетик ёндошув асосида тўғри масала ечилган ва  $\alpha = 2,4992 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$  қийматда диффузион ва кинетик ёндашувлар яқин натижаларни қайд қилиши кўрсатилган.

4.3-параграфда мувозанат адсорбцияни ҳисобга олиб, марказида цилиндрик макроғовак жойлашган цилиндрик ғовак муҳитдаги модда кўчиши коэффициенти қийматини топишнинг тескари коэффициенти масаласи ечилган. Икки соҳали цилиндрик ғовак муҳитда чизикли мувозанат адсорбцияни ҳисобга олиб, диффузион ва кинетик ёндашувларда яқин натижаларни қайд қилувчи масса кўчиш коэффициентининг  $\alpha = 2,86623 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$  қиймати аниқланган (6-расм).



5-расм.  $z_k(t)$  функция графиги.



6-расм.  $c_{im}$  концентрациянинг диффузион ва кинетик ёндашувларидаги профиллари  
1 -  $t = 450$  с, 2 -  $t = 900$  с, 3 -  $t = 1800$  с,  
4 -  $t = 2700$  с.

## ХУЛОСА

“Агрегатланган ғовак муҳитларда модда кўчишининг гидродинамик масалалари” мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Диффузион ва кинетик ёндашувлари асосида биржинслимас ғовак муҳитларда модда кўчиш жараёнининг математик модели тузилган. Масса кўчиш коэффициентининг иккала ёндашувлар учун натижаларни бир-бирига яқин келтирувчи қиймати аниқланган.

2. Марказида цилиндрик макроғовак жойлашган горизонтал цилиндрик ғовак муҳитда модда кўчиш масаласи адсорбция ҳодисаларини ҳисобга олиб (чизикли мувозанат, чизикли номувозанат, ночизикли мувозанат, ночизикли номувозанат) қаралган. Масса кўчиш масаласи иккита ҳолат учун таҳлил қилинган: диффузия тенгламаси ва кинетик масса кўчиши тенгламалари асосида. Масса кўчиш коэффициентининг юқоридаги адсорбция ҳодисаларини ҳисобга олган ҳолларда, иккала ёндашувлар учун натижаларни бир-бирига яқин келтирувчи қийматлари топилган.

3. Икки соҳали цилиндрик ғовак муҳитда сизиш тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланишини ҳисобга олиб, босимнинг тарқалиши, сизиш тезлиги майдони ва модда концентрацияси аниқланган.

4. Муҳит ўтказувчанликнинг ғовак муҳитда босимнинг тарқалишига ва суюқлик ҳаракати тезлигига ахамиятли таъсири кўрсатилган. Муҳитнинг ҳар хил хусусиятли соҳалари муҳитда модда сизишига таъсир қилганидек, модданинг кўчишига ҳам сезиларли таъсирини ўтказди. Биржинслимас сизиш тезлиги майдонининг тақсимланиши кўчиш жараёнининг умумий манзарасини сезиларли ўзгартиради.

5. Икки соҳали цилиндрик муҳитда модда кўчишини сизиш тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланиши ҳамда чизикли (мувозанат ва номувозанат) ва ночизикли (мувозанат ва номувозанат) адсорбцияланиш ҳодисаларини ҳисобга олиб ечилган. Модда кўчиши жараёнида адсорбция ҳодисасини ҳисобга олиш нисбий концентрация майдонининг илгариланиши секинлаштириши кўрсатилган.

6. Макро ва микроғовак муҳитдан ташкил топган цилиндрик муҳитда адсорбцияни ҳисобга олган ва олмаган ҳолларда модда кўчишининг тескари коэффициентли масаласи қўйилган ва сонли ечилган. Кинетика тенгламасидаги масса кўчиш коэффициентининг қийматини аниқлашнинг тескари масаласини ечиш учун диффузион ёндошув асосида ечилган тўғри масаланинг натижаларидан “бошланғич маълумотлар” тайёрланган. Тескари масала натижасидан фойдаланиб, кинетик ёндошув асосида тўғри масала ечилиб диффузион ва кинетик ёндашувлар натижаси бир-бирига яқинлиги кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.08.2018.FM/Т.02.09  
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ  
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**СУЛАЙМОНОВ ФОЗИЛ УРАЛОВИЧ**

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ПЕРЕНОСА ВЕЩЕСТВА  
В АГРЕГИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

**01.02.05 – Механика жидкости и газа**

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

**Самарканд–2019**

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2017.3.PhD/FM126.

Диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете.

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

**Научный руководитель:** Хужаёров Бахтиёр Хужаёрович  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** Маликов Зафар Маматкулович  
доктор технических наук  
Джабборов Мамасоли Содикович  
кандидат физико-математических наук, доцент

**Ведущая организация:** Научно-исследовательский центр информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий

Защита диссертации состоится «17» мая 2019 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.30.08.2018.FM/T.02.09 при Самаркандском государственном университете (Адрес: 104000, Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (+99866) 239-11-40, факс: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: [devonxona@samdu.uz](mailto:devonxona@samdu.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Самаркандского государственного университета. (регистрационный номер 87). Адрес: 140104, Самарканд, Университетский бульвар, 15. (+99866) 239-17-25.

Автореферат диссертации разослан «3» мая 2019 года.  
(реестр протокола рассылки № 3 от «3» мая 2019 года.)



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

**А. Абдирашидов**  
Ученый секретарь научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
доктор физико-математических наук, доцент

**Ж. А. Акилов**  
Заместитель председателя научного семинара при  
научном совете по присуждению ученых степеней,  
доктор физико-математических наук, профессор

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире изучение вопросов переноса вещества в неоднородных пористых средах имеет важное практическое значение в различных областях техники, в частности, при подземной утилизации различных загрязняющих веществ, охране окружающей среды, добыче нефти и газа и др. Закачиваемое вместе с водой загрязняющее вещество продвигаясь по высокопроницаемым каналам, поропластам, по поровому пространству резервуара может распространяться на значительные расстояния по пласту. Важное значение при этом имеет оценка эффективности резервуара, как хранилища загрязняющих веществ. Поэтому особое внимание уделяется разработке математических моделей и численных алгоритмов переноса веществ в пористых средах во многих зарубежных странах, в том числе США, Англии, Франции, Китая, Японии, России и других развитых странах, а также созданию современных вычислительных программных обеспечений.

В мире исследуются показатели фильтрации в макроскопически неоднородных средах, в том числе проводятся направленные научные исследования переноса веществ и движения жидкости в агрегированных пористых средах, влияния неоднородности скелета пористой среды. В этом направлении, в частности, исследование сложных процессов переноса смесей и движения различных неоднородных жидкостей в агрегированных пористых средах с определенной геометрией, разработка математических моделей и вычислительных алгоритмов определения параметров реальных объектов является одной из самых важных задач. В связи с этим, разработка математических моделей с использованием диффузионного и кинетического подходов, эффективных алгоритмов и программ считается актуальным.

В нашей стране теория переноса веществ стала важным инструментом в физике почв, в частности при описании движения пестицидов, нитратов, тяжелых металлов и других веществ через пористые среды, охране окружающей среды, добыче нефти и газа и других областях техники. Эти исследования могут дать значительную информацию о поведении химического вещества в пористой среде (диффузия, дисперсия, исключение анионов, адсорбция или обменные процессы) и о самой пористой среде (распределение размеров пор, агрегирование). В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах поставлены задачи, в том числе «...дальнейшая модернизация и диверсификация промышленности путем перевода ее на качественно новый уровень ...; ... развитие сети ... ирригационных объектов ...»<sup>2</sup>. Реализация этих задач, в том числе разработка передовых математических моделей, представляющих процессы переноса и фильтрации в пористых средах, является одной из важнейших задач.

---

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» №УП-4947 от 7 февраля 2017 г.

В определенной степени, данное диссертационное исследование служит осуществлению задач, определенных в нормативно-правовых документах касательно данной деятельности, в частности, к таковым относятся Постановления Президента Республики Узбекистан ПП-3286 от 25 сентября 2017 года «О мерах по усовершенствованию системы защиты водных объектов», ПП-3107 от 30 июня 2017 года «Об усовершенствовании системы управления нефтегазодобывающей промышленностью» и ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», а также другие нормативно-правовые акты по данной деятельности.

**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 математических моделей сложных динамических процессов фильтрации и переноса в нефтегазовых и водоносных пластах и их численная реализация рассмотрены в работах таких ученых, как J.Bear, Van Genuchten M.Th., Wierenga P.J., Coats, K.H., Smith, F.N. Dalton, I. Hashimoto, B.D.Rasmuson A., I. Neretnieks, N.W.Haws, J.L.Auriault, Green R. E., P.S-C. Rao, J. C. Corey, R.E.Jessup, E.L.Cussler, J.M.Davidson, Drummond J. E, J.P.Gaudet, R.Haggerty, M.Hilpert, M.R.Paraskewich, Biggar J. W., D. R. Nielsen, Cameron D.R., Klute A, M.M.Rahman, P.Royer, H.M.Selim, G.Vachaud, Parker J.C., A.J.Valocchi, W.P.Ball, R.J.Wagenet, D.F.Young и др.

В Узбекистане существенную лепту в разработку математических моделей и вычислительных методов для исследования, прогнозирования и управления процессами движения жидкости и газа в пористых средах внесли такие отечественные ученые, как Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Дж.Ф.Файзуллаев, Н.М.Мухидинов, Р.Садуллаев, И.Алимов, Б.Х.Хужаёров, Ж.Акилов, Н.Равшанов, И.К.Хужаев, Ш.Каюмов, В.Ф.Бурнашев и др.

**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 №19.12 «Разработка математических моделей и численных анализ инженерных и природных процессов» (2000-2018), а также фундаментальными грантами №ФА-Ф1-Ф042 «Разработка и исследование гидродинамических моделей фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах» (2007-2011) и №ФА-Ф078 «Гидродинамические задачи фильтрования и фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах» (2012-2016).

**Целью исследования** является усовершенствование математических моделей процессов переноса вещества в агрегированной пористой среде с определенной геометрией с учетом адсорбционных явлений и фильтрации неоднородной жидкости в коаксиальной цилиндрической пористой среде с



учетом неоднородного распределения поля скоростей фильтрации, а также разработка численных алгоритмов решения задач.

**Задачи исследования:** В соответствии с целью в работе ставятся следующие задачи:

разработка методов решения задач на основе кинематических моделей переноса веществ и движения жидкости в агрегативных пористых средах;

решение задач переноса веществ в коаксиальной цилиндрической пористой среде в диффузионной и кинетической постановках и определение значения коэффициента массопереноса, для которого оба подхода дают близкие результаты;

решение задачи переноса веществ с учетом адсорбционных явлений в горизонтально установленной цилиндрической пористой среде с центральной цилиндрической макропорой и анализ переноса вещества для двух случаев: на основе диффузионного и кинетического подходов;

постановка и решение задачи фильтрации и переноса веществ в цилиндрической пористой среде с неоднородным распределением поля скоростей фильтрации в макропоре с учетом и без учета адсорбционных явлений;

постановка и решение коэффициентных обратных задач по определению коэффициента массопереноса в кинетическом уравнении с использованием результатов прямой задачи диффузионного подхода с учетом адсорбционных эффектов.

**Объектом исследования** является цилиндрическая пористая среда с центральной цилиндрической макропорой.

**Предмет исследования.** Математическое моделирование, вычислительные алгоритмы для проведения вычислительного эксперимента на ЭВМ, гидродинамический анализ процессов переноса веществ и движения жидкости в неоднородных цилиндрических пористых средах.

**Методы исследования.** Составление моделей переноса вещества и гидродинамические задачи движения жидкости в неоднородной цилиндрической пористой среде на основе фундаментальных законов сохранения механики и дополнительных феноменологических гипотез, решение задач нелинейных дифференциальных уравнений с помощью конечноразностных схем.

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

поставлена и решена задача переноса вещества в неоднородной цилиндрической среде на основе диффузионного и кинетического подходов, определено такое значение коэффициента массопереноса в кинетическом уравнении, для которого оба подхода дают близкие результаты, определены значения коэффициента массопереноса с учетом адсорбции (линейной, нелинейной, равновесной, неравновесной), влияние адсорбции на перенос вещества в различных средах;

усовершенствована математическая модель движения жидкости и переноса вещества в двухзонной цилиндрической пористой среде с учетом неодно-

родного распределения поля скоростей фильтрации без учета и с учетом адсорбции, разработан эффективный численный алгоритм решения задачи;

установлены характерные особенности переноса веществ и его адсорбции в агрегированных пористых средах;

найжены значения коэффициента массопереноса в кинетическом уравнении путем решения коэффициентной обратной задачи, для которых диффузионный и кинетический подходы дают близкие результаты.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

составлен алгоритм расчета переноса веществ в неоднородной пористой среде на основе диффузионного и кинетического подходов;

разработана математическая модель переноса веществ в неоднородной цилиндрической пористой среде с учетом и без учета адсорбционных явлений;

разработаны программные средства, предназначенные для расчета переноса веществ в неоднородной цилиндрической пористой среде с учетом адсорбции.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследования обосновывается соответствием характера расчетных результатов реальным физическим процессам и подробным физическим анализом полученных результатов. При применении численных методов проверена их устойчивость, соблюдена необходимая точность. Детально проведен физический анализ полученных результатов, проверено их соответствие реальным физическим процессам.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в усовершенствовании моделей переноса веществ в неоднородных средах. Разработанные модели и алгоритмы являются определенным вкладом в теорию переноса и фильтрации жидкости в агрегированных пористых средах.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы при качественном и количественном анализе процессов очистки сточных вод и питьевой воды, добычи нефти и газа вторичными методами, гидрологии, где происходит перенос веществ и движение жидкостей в неоднородных пористых средах.

**Внедрение результатов исследования.** По результатам исследований составлены программные продукты, математические модели, численные алгоритмы, разработанные по усовершенствованным моделям процессов движения жидкости и переноса веществ в неоднородных пористых средах.

Результаты использованы:

для оценки распространения загрязнений и осадков, попадающих вместе с водой, определения объемов и илизации в процессе заполнения водой водохранилища при Джизакском управлении ирригационной системы “Сирдаря-Зарафшан” посредством программ и методов решения моделей движения жидкости и переноса вещества в неоднородной пористой среде с учетом массообмена с окружающей средой (справка №03/20-2997 от 25 декабря 2018 года Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан).

Результаты научного исследования дают возможность увеличить на 7-10 % точность расчетов и оценки гидродинамических параметров процесса инфильтрации при использовании, хранения запаса воды и заполнения хранилищ;

для оценки явления кольматации илистого дна Джизакского водохранилища посредством программ и алгоритмов усовершенствованных расчетов влияния неоднородности среды и переноса массы во внешнюю среду из двухзонной неоднородной пористой среды (справка №03/20-2997 от 25 декабря 2018 года Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан). Результаты научных исследований дают возможность увеличить в 10-15 % коэффициент полезного действия используемых инженерных расчетов,

при расчете распределения по прибрежной длине илистых осадков дна в части выливания в Джизакском водохранилище, посредством программ и алгоритмов расчетов переноса веществ в двухзонной среде с нелинейной кинетикой (справка №03/20-2997 от 25 декабря 2018 года Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан). Результаты научных исследований дают возможность увеличить в 5-7% коэффициент полезного действия используемых инженерных расчетов;

численный алгоритм и программный продукт «Расчет переноса веществ в неоднородный цилиндрический пористой среде с учетом адсорбции» использовались в рамках зарубежного научно-исследовательского гранта 92-2015-03 (A mobile irrigation system for greenhouse), для моделирования и изучения распределения удобрений в процессе фильтрации (Университет Нилай, Малайзия, справка от 13 ноября 2018 года). В результате получены данные о распределении концентрации удобрений и решении дифференциальных уравнений с учетом равновесных и неравновесных явлений адсорбции при линейном и нелинейном переносе веществ.

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования были обсуждены на 16 научных конференциях, в том числе на 6 международных и 10 республиканских.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 22 научных работ, из них 6 входят в перечень научных изданий, предложенных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 2 опубликованы в зарубежных журналах и 4 – в республиканских научных изданиях.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 105 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, приведены обзор зарубежных науч-

ных исследований по теме диссертации и степень изученности проблемы, сформулированы 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 **«Перенос вещества и движение жидкости в макроскопически неоднородных пористых средах»**, приводится анализ проблем моделирования процесса переноса веществ в неоднородных пористых средах. Рассматривается перенос веществ на основе диффузионного и кинетического подходов, анализируется влияние адсорбционных явлений. Проведен анализ численных методов решения задачи переноса веществ в неоднородной пористой среде.

В параграфе 1.1 приведены некоторые сведения об экспериментальных, полевых исследованиях, математическом моделировании переноса веществ, движения жидкости в макроскопически неоднородных пористых средах и основных характеристиках процесса.

В параграфе 1.2 рассматривается роль адсорбционных явлений при переносе веществ. Поверхность пород может адсорбировать растворенные или взвешенные в жидкости вещества. За счет адсорбции веществ на поверхности скелета пород их концентрация в растворе уменьшается. При адсорбции из жидких сред устанавливается равновесие между количеством адсорбированного вещества и концентрацией в растворе.

Параграф 1.3 посвящен анализу наличия зон с неподвижной жидкостью в задачах переноса веществ. Такие зоны оказывают существенное влияние на процессы переноса вещества, т.к. происходит диффузионный перенос вещества из зон с подвижной жидкостью в зоны с неподвижной жидкостью. Приведены примеры переноса веществ в макроскопически неоднородной среде с определенной геометрией.

В параграфе 1.4 приведены методы численной реализации моделей переноса веществ в макроскопически неоднородных пористых средах.

Во второй главе диссертации, названной **«Перенос вещества в неоднородной цилиндрической среде»**, поставлены и численно решены задачи движения жидкости и переноса вещества в цилиндрической двухслойной среде, где внутренняя цилиндрическая область принимается как макропора, а внешняя цилиндрическая – как микропора.

В параграфе 2.1 решается задача переноса вещества в цилиндрической пористой среде с центральной цилиндрической макропорой в диффузионной постановке.

Рассматривается цилиндрическая пористая среда с цилиндрической макропорой в центре (Рис.1). Макропора имеет радиус  $a$  и окружена цилиндрической средой с внешним радиусом  $b$ . Последняя имеет низкую пористость и проницаемость, следовательно, движение жидкости в ней пренебрежимо мало. Используются следующие соотношения

$$V_f = \frac{a^2}{b^2}, \quad V_a = 1 - V_f, \quad \theta_m = V_f \theta_f, \quad \theta_{im} = V_a \theta_a,$$

где  $V_f, V_a$  - объемные доли макропоры и микропоры в единице объема среды;  $\theta_f, \theta_a$  - локальные коэффициенты пористости макропоры и микропоры;  $\theta_m, \theta_{im}$  - относительные коэффициенты пористости макропоры и микропоры.

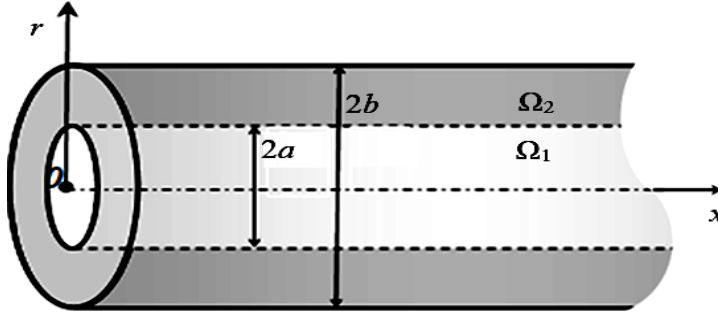


Рис.1. Цилиндрическая среда с цилиндрической макропорой.

Перенос вещества в макропоре считается одномерным, что позволяет ввести понятие осредненной по поперечному сечению внутреннего цилиндра концентрации -  $c_m$ .

В макропоре перенос вещества в одномерной постановке описывается уравнением

$$\theta_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $c_{im}$  - средняя концентрация вещества в микропоре

$$c_{im} = \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b r c_a(t, x, r) dr, \quad (2)$$

$D_m$  - коэффициент гидродинамической дисперсии,  $v_m$  - средняя скорость вещества в макропоре,  $c_a$  - локальная концентрация вещества в микропоре,  $t$  - время,  $x$  - расстояние.

Средняя концентрация  $c_{im}$  представляет собой осреднение локальной концентрации в микропоре. Распространение вещества в этой части среды описано уравнением обычной диффузии

$$\frac{\partial c_a}{\partial t} = \frac{D_a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_a}{\partial r} \right), \quad a < r < b, \quad (3)$$

где  $D_a$  является коэффициентом эффективной диффузии.

Затем анализируется эта же задача на основе кинетического уравнения массопереноса из макропоры в микропору

$$\theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \alpha (c_m - c_{im}), \quad (4)$$

т.е. вместо (2), (3) используется кинетическое уравнение массопереноса. Здесь  $\alpha = \text{const}$  - коэффициент массопереноса.

Уравнение (3) дополняется условием непрерывности концентрации на общей границе микро- и макропоры

$$c_a(t, x, a) = c_m(t, x). \quad (5)$$

В микропоре продольное распространение вещества не учитывается и внешняя граница ( $r = b$ ) является непроницаемой для вещества

$$\frac{\partial c_a(t, x, b)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

В точке  $x = 0$  по всей площади поперечного сечения  $0 \leq r \leq a$  начиная с  $t > 0$  в среду поступает неоднородная жидкость с постоянной концентрацией вещества  $c_0$  и со средней постоянной скоростью  $v_m$ . Начальные и граничные условия принимаются в виде:

$$c_m(0, x) = 0, \quad (7)$$

$$c_{im}(0, x) = 0, \quad (8)$$

$$c_a(0, x, r) = 0, \quad (9)$$

$$c_m(t, 0) = c_0, \quad c_0 = \text{const}, \quad (10)$$

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

Уравнения (1) - (4) решаются с начальными и граничными условиями (5) - (11) методом конечных разностей. Определено поле местной концентрации  $c_a$ , а также показаны профили изменения концентраций  $c_m$ ,  $c_{im}$ . Определяется такое значение коэффициента массопереноса ( $\alpha = 2.8 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ ), для которого оба подхода дают близкие результаты.

В параграфе 2.2 рассматривается задача §2.1 с учетом адсорбции. Для этого случая уравнения переноса имеют вид

$$\theta_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \rho_m \frac{\partial s_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} + \rho_{im} \frac{\partial s_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m}{\partial x}, \quad (12)$$

$$s_{im} = \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b r s_a(x, r, t) dr, \quad (13)$$

$$\theta_a \frac{\partial c_a}{\partial t} + \rho_a \frac{\partial s_a}{\partial t} = \theta_a D_a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_a}{\partial r} \right), \quad a < r < b, \quad (14)$$

где  $s_m$ ,  $s_{im}$  - концентрация адсорбированного вещества в макропоре и микропоре,  $s_a$  - локальная концентрация адсорбированного вещества в микропоре,  $\rho_m$ ,  $\rho_{im}$  - объемные плотности макропоры и микропоры, соответственно.

Используются изотермы Генри в виде

$$s_m = k_m c_m, \quad s_a = k_a c_a, \quad s_{im} = k_{im} c_{im}, \quad (15)$$

где  $k_m$ ,  $k_{im}$  - адсорбционный коэффициент вещества в макропоре и микропоре,  $k_a$  - местный адсорбционный коэффициент в микропоре.

Поставляя (15) в (12) и (14) получаем

$$\theta_m R_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \theta_{im} R_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial x^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m}{\partial x}, \quad (16)$$

$$R_a \frac{\partial c_a}{\partial t} = D_a \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_a}{\partial r} \right), \quad (17)$$

где  $R_m$ ,  $R_{im}$ ,  $R_a$  - коэффициенты ретардации

$$R_m = 1 + \frac{\rho_m k_m}{\theta_m}, \quad R_{im} = 1 + \frac{\rho_{im} k_{im}}{\theta_{im}}, \quad R_a = 1 + \frac{\rho_a k_a}{\theta_a}.$$

Задача (16), (17) решается методом конечных разностей. Определены поле местной концентрации  $c_a$ , местная концентрация адсорбированного вещества  $s_a$  в зоне с неподвижной жидкостью, построены профили изменения концентраций  $c_m$ ,  $c_{im}$  и концентрации адсорбированного вещества  $s_m$ ,  $s_{im}$ .

Далее уравнение (16) решается совместно с кинетическим уравнением, которое при учете адсорбции имеет вид

$$\theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} + \rho_{im} \frac{\partial s_{im}}{\partial t} = \alpha (c_m - c_{im}). \quad (18)$$

В случае линейной изотермы Генри (15) из (18) получаем

$$\theta_{im} R_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \alpha (c_m - c_{im}). \quad (19)$$

Определены такие значения коэффициента  $\alpha$  ( $\alpha = 3 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ), для которых оба подхода дают близкие результаты.

В параграфе 2.3 рассматривается перенос вещества в цилиндрической среде с цилиндрической макропорой с учетом неравновесной адсорбции. В этом случае кинетические уравнения адсорбции имеют вид

$$\beta \frac{\partial s_m}{\partial t} = k c_m - s_m, \quad (20)$$

$$\beta \frac{\partial s_{im}}{\partial t} = k c_{im} - s_{im}, \quad (21)$$

$$\beta \frac{\partial s_a}{\partial t} = k c_a - s_a, \quad (22)$$

где  $\beta$  - характерное время перехода от неравновесной к равновесной адсорбции. Проводится сравнительный анализ с предыдущими случаями, определяется коэффициент  $\alpha$  ( $\alpha = 2.91 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ), при котором получаются близкие результаты для обоих подходов.

В параграфе 2.4 рассматриваются те же задачи для равновесной адсорбции по изотерме Фрейндлиха

$$s = k c^n, \quad 0 < n < 1. \quad (23)$$

В этом случае в уравнениях (16), (17) изменяются только ретардационные коэффициенты

$$R_m = 1 + \frac{\rho_m k_m n c_m^{n-1}}{\theta_m}, \quad (24)$$

$$R_{im} = 1 + \frac{\rho_{im} k_{im} n c_{im}^{n-1}}{\theta_{im}}, \quad (25)$$

$$R_a = 1 + \frac{\rho_a k_a n c_a^{n-1}}{\theta_a}. \quad (26)$$

Анализируется задача на основе кинетического уравнения (19), в котором ретардационный коэффициент  $R_{im}$  определяется из соотношения (25). Проведен сравнительный анализ результатов, полученных при использовании изотермы Фрейндлиха и линейной изотермы Генри. При значении коэффициента массопереноса  $\alpha$ , равном  $3.64 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , оба подхода дают близкие результаты при малых значениях времени.

Далее решалась задача с использованием нелинейных кинетических уравнений адсорбции, которые имеют вид

$$\beta \frac{\partial s_m}{\partial t} = kc_m^n - s_m, \quad (27)$$

$$\beta \frac{\partial s_{im}}{\partial t} = kc_{im}^n - s_{im}, \quad (28)$$

$$\beta \frac{\partial s_a}{\partial t} = kc_a^n - s_a. \quad (29)$$

Оценена роль адсорбции разного вида на характеристики переноса вещества в цилиндрической среде с цилиндрической макропорой. При значении коэффициента массопереноса  $\alpha$ , равном  $3.335 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , оба подхода дают близкие результаты при малых значениях времени.

Разработан программный комплекс «Расчет переноса веществ в неоднородной цилиндрической пористой среде с учетом адсорбции», который позволяет вычислять концентрации вещества в макро- и микропорах цилиндрической среды (Рис.2-4).

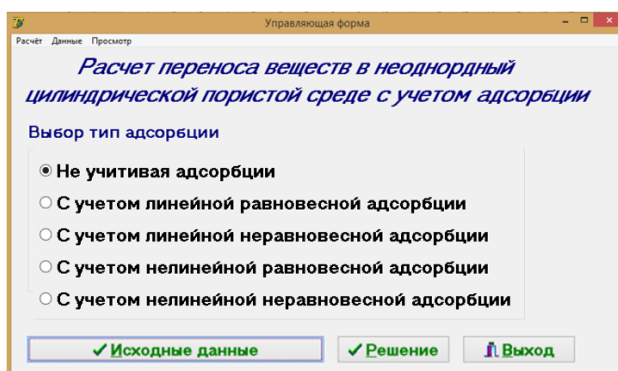


Рис. 2. Управляющая форма.

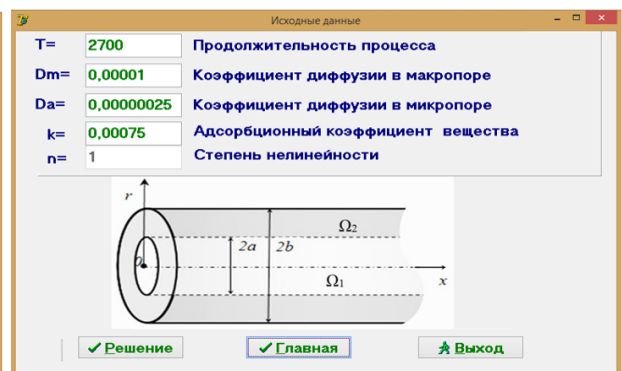


Рис. 3. Окно ввода данных.

Программа позволяет получить профили изменения концентрации вещества с учетом и без адсорбционных явлений (в виде таблицы в отдельном файле и графическом видах). Она оснащена графическим интерфейсом, работает в диалоговом режиме, все результаты хранятся в текстовых файлах, что позволяет использовать их в различных формах.



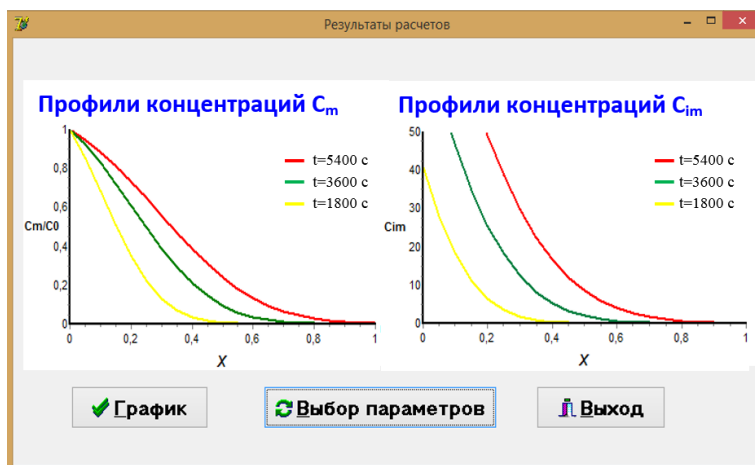


Рис. 4. Форма для вывода результатов расчетов в графическом виде.

В третьей главе диссертации, названной «Движение жидкости и перенос вещества в двухзонной цилиндрической пористой среде с учетом неоднородного распределения поля скоростей фильтрации», исследовано движение жидкости и перенос вещества в двухзонной цилиндрической пористой среде с учетом неоднородного распределения поля скоростей фильтрации.

В параграфе 3.1 приведены некоторые сведения об экспериментальных и теоретических исследованиях задач переноса веществ в неоднородных средах с включениями определенной геометрии.

Далее рассматривается цилиндрическая пористая среда с радиусом  $b$  с цилиндрической “макропорой” в центре с радиусом  $a$  (Рис.1). Таким образом, область исследования задачи состоит из двух частей, которые отличаются друг от друга фильтрационно-емкостными свойствами. С точки  $(0,0)$  подается жидкость с постоянным давлением  $p_c = \text{const}$ . Первоначально в среде было постоянное давление  $p_0$ ,  $p_0 < p_c$ .

Внешняя цилиндрическая область  $\Omega_2$  имеет проницаемость  $k_2$ , а внутренняя  $\Omega_1$  -  $k_1$ , где  $k_2 \ll k_1$ . Боковая поверхность цилиндрической пористой среды непроницаема. Компоненты скорости фильтрации в  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  определяются по закону Дарси

$$v_{1x} = -\frac{k_1}{\mu} \frac{\partial p_1}{\partial x}, \quad v_{1r} = -\frac{k_1}{\mu} \frac{\partial p_1}{\partial r}, \quad (r, x) \in \Omega_1, \quad (30)$$

$$v_{2x} = -\frac{k_2}{\mu} \frac{\partial p_2}{\partial x}, \quad v_{2r} = -\frac{k_2}{\mu} \frac{\partial p_2}{\partial r}, \quad (r, x) \in \Omega_2, \quad (31)$$

где  $p_1, p_2$  – давления в областях  $\Omega_1, \Omega_2$ ,  $\mu$  – коэффициент вязкости вещества.

Для определения давления в  $\Omega_1, \Omega_2$  используем уравнения пьезопроводности

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = \chi_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} \right\}, \quad (r, x) \in \Omega_1, \quad (32)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial t} = \chi_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p_2}{\partial x^2} \right\}, \quad (r, x) \in \Omega_2, \quad (33)$$

$$\chi_1 = \frac{k_1}{\mu \beta^*}, \quad \chi_2 = \frac{k_2}{\mu \beta^*},$$

$\chi_1, \chi_2$  – коэффициенты пьезопроводности,  $\beta^*$  – коэффициент упругости среды ( $\beta^* = m\beta_{жс} + \beta_c$ ,  $\beta_{жс}$  – коэффициент объемной упругости вещества и  $\beta_c$  – среды).

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$p_1(0, r, x) = p_2(0, r, x) = p_0, \quad p_0 = \text{const}, \quad (34)$$

$$p_1(t, 0, 0) = p_c, \quad p_c = \text{const}, \quad p_c > p_0, \quad (35)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial x}(t, r, 0) = 0, \quad 0 < r \leq a, \quad (36)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial x}(t, r, \infty) = 0, \quad 0 < r \leq a, \quad (37)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial r}(t, 0, x) = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad (38)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial x}(t, r, 0) = 0, \quad a < r \leq b, \quad (39)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial x}(t, r, \infty) = 0, \quad a < r \leq b, \quad (40)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial r}(t, b, x) = 0, \quad 0 < x < \infty, \quad (41)$$

$$k_1 \frac{\partial p_1}{\partial r}(t, a, x) = k_2 \frac{\partial p_2}{\partial r}(t, a, x), \quad 0 \leq x < \infty, \quad (42)$$

$$p_1(t, a, x) = p_2(t, a, x), \quad 0 \leq x < \infty. \quad (43)$$

Система уравнений (30) – (33) с начальными и граничными условиями (34) – (43) решается методом конечных разностей. Определено поле давлений, скоростей фильтрации в обеих зонах.

В параграфе 3.2 поставлена и численно решена задача переноса вещества и движения жидкости в цилиндрической двухзонной среде с учетом неоднородного распределения поля скоростей фильтрации. Математическое описание движения жидкости и переноса вещества в цилиндрической двухслойной среде при упругом режиме включает в себя следующие уравнения:

$$\theta_1 \frac{\partial c_1}{\partial t} + v_{1x} \frac{\partial c_1}{\partial x} + v_{1r} \frac{\partial c_1}{\partial r} = \theta_1 D_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} \right\}, \quad (r, x) \in \Omega_1, \quad (44)$$

$$\theta_2 \frac{\partial c_2}{\partial t} + v_{2x} \frac{\partial c_2}{\partial x} + v_{2r} \frac{\partial c_2}{\partial r} = \theta_2 D_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} \right\}, \quad (r, x) \in \Omega_2, \quad (45)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – пористости;  $c_1, c_2$  – объемные концентрации;  $D_1, D_2$  – коэффициенты диффузии в  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , соответственно (здесь и далее индекс 1 соответствует макропоре, а 2 - микропоре).

Эта задача также решается методом конечных разностей. Компоненты скорости фильтрации в (44), (45) определяются из задачи (30) – (43). Определены распределение давления, поле скоростей фильтрации, концентрация вещества в цилиндрической двухслойной среде с учетом неоднородного распределения поля скоростей фильтрации и анализировано влияние проницаемости на распределение давления и скорости вещества в пористой среде.

В параграфе 3.3 решается та же задача с учетом линейной равновесной и неравновесной адсорбции. Математическое описание движения жидкости и перенос вещества в цилиндрической двухслойной среде с учетом адсорбции представим в следующем виде:

$$\theta_1 \frac{\partial c_1}{\partial t} + v_{1x} \frac{\partial c_1}{\partial x} + v_{1r} \frac{\partial c_1}{\partial r} + \rho_1 \frac{\partial s_1}{\partial t} = \theta_1 D_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} \right\}, (r, x) \in \Omega_1, \quad (46)$$

$$\theta_2 \frac{\partial c_2}{\partial t} + v_{2x} \frac{\partial c_2}{\partial x} + v_{2r} \frac{\partial c_2}{\partial r} + \rho_2 \frac{\partial s_2}{\partial t} = \theta_2 D_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} \right\}, (r, x) \in \Omega_2, \quad (47)$$

где  $s_1, s_2$  – концентрации адсорбированного вещества,  $\rho_1, \rho_2$  – плотности макропористой и микропористой сред.

В зависимости от вида адсорбции рассмотрим два случая.

**а) Линейная равновесная адсорбция.**

В этом случае используются изотермы Генри в виде

$$s_1 = k_1^* c_1, \quad s_2 = k_2^* c_2, \quad (48)$$

где  $k_1^*, k_2^*$  – адсорбционные коэффициенты вещества в макропоре и микропоре.

**б) Линейная неравновесная адсорбция.** В этом случае кинетические уравнения адсорбции используются в виде

$$\frac{\partial s_1}{\partial t} = \frac{k_1'}{\rho_1} c_1 - k_1'' s_1, \quad \frac{\partial s_2}{\partial t} = \frac{k_2'}{\rho_2} c_2 - k_2'' s_2, \quad (49)$$

где  $k_1', k_1'', k_2', k_2''$  – постоянные.

Определены поля относительной концентрации и давления в  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ .

В параграфе 3.4 решается задача переноса вещества в цилиндрической двухзонной среде с учетом неоднородного распределения поля скоростей фильтрации и нелинейной адсорбции.

**а) Нелинейная равновесная адсорбция.** Задачу решаем для нелинейной равновесной адсорбции по изотерме Фрейндлиха

$$s_1 = k_1^* c_1^n, \quad s_2 = k_2^* c_2^n, \quad 0 < n < 1. \quad (50)$$

В этом случае уравнения (46), (47) с учетом (50) представляются в виде

$$\left( \theta_1 + \rho_1 k_1^* n c_1^{n-1} \right) \frac{\partial c_1}{\partial t} + v_{1x} \frac{\partial c_1}{\partial x} + v_{1r} \frac{\partial c_1}{\partial r} = \theta_1 D_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} \right\}, (r, x) \in \Omega_1 \quad (51)$$

$$(\theta_2 + \rho_2 k_2^* n c_2^{n-1}) \frac{\partial c_2}{\partial t} + v_{2x} \frac{\partial c_2}{\partial x} + v_{2r} \frac{\partial c_2}{\partial r} = \theta_2 D_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial c_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} \right\}, (r, x) \in \Omega_2. \quad (52)$$

б) Нелинейная неравновесная адсорбция. В этом случае используются нелинейные кинетические уравнения адсорбции

$$\frac{\partial s_1}{\partial t} = \frac{k'_1}{\rho_1} c_1^n - k''_1 s_1, \quad \frac{\partial s_2}{\partial t} = \frac{k'_2}{\rho_2} c_1^n - k''_2 s_2. \quad (53)$$

Определены поля относительной концентрации вещества и адсорбции вещества в обеих зонах. Сравнивая с предыдущими случаями, анализирован перенос вещества в этой среде с учетом нелинейной равновесной, неравновесной адсорбции.

В четвертой главе диссертации, названной «**Идентификация параметров переноса веществ в неоднородных пористых средах**», исследуются обратные задачи переноса веществ для определения коэффициента массопереноса с учетом и без учета адсорбции.

В параграфе 4.1 приведены общие сведения о классификации обратных задач, в частности задачи идентификации параметров переноса вещества в неоднородных пористых средах.

В параграфе 4.2 решается обратная задача определения коэффициента массопереноса в цилиндрической двухзонной среде. Для того, чтобы определить коэффициент массопереноса используем решение прямой задачи в определенных точках пласта, полученное на основе диффузионного подхода. Следовательно, исходными данными для обратной задачи является решение прямой задачи в определенных точках пласта

$$c_m(t, x_k) = z_k(t), \quad t \in [0, T], \quad k = 1, 2, 3. \quad (54)$$

Концентрация вещества в характерных точках пласта  $x = x_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) является известной функцией времени  $z_k(t)$  (Рис.5).

Коэффициент  $\alpha$  будем искать из условия минимума функционала

$$J(\alpha) = \sum_{k=1}^3 \int_0^T [c_m(t, x_k) - z_k(t)]^2 dt. \quad (55)$$

Уравнения (1), (4) при  $\alpha = \alpha^s$ , где  $\alpha^s$  - заданное значение, примут вид

$$\theta_m^s \frac{\partial c_m^s}{\partial t} + \theta_{im}^s \frac{\partial c_{im}^s}{\partial t} = \theta_m^s D_m^s \frac{\partial^2 c_m^s}{\partial x^2} - \theta_m^s v_m^s \frac{\partial c_m^s}{\partial x}, \quad (56)$$

$$\theta_{im}^s \frac{\partial c_{im}^s}{\partial t} = \alpha^s \left( c_m^s - c_{im}^s \right). \quad (57)$$

Для определения коэффициента  $\alpha$  из минимума функционала (55) составлены программы в среде Matlab.7.6.0(R2008a). Решена также прямая задача на основе кинетического подхода с использованием найденного решения обратной задачи и показано, что при  $\alpha = 2,4992 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  диффузионный и кинетический подходы дают близкие результаты.

В параграфе 4.3 рассмотрена обратная коэффициентная задача по определению коэффициента массопереноса в кинетическом уравнении с учетом равновесной адсорбции. Определен коэффициент массопереноса в цилиндрической двухзонной пористой среде с учетом линейной равновесной адсорбции, найдено значение  $\alpha = 2,86623 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , для которого оба подхода дают близкие результаты (Рис.6).

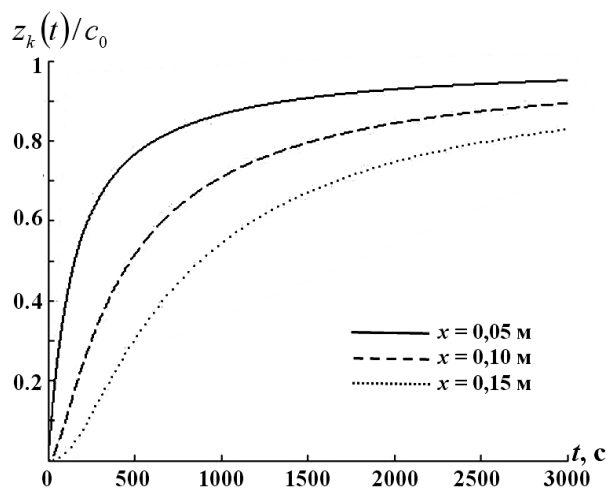


Рис.5 График функции  $z_k(t)$

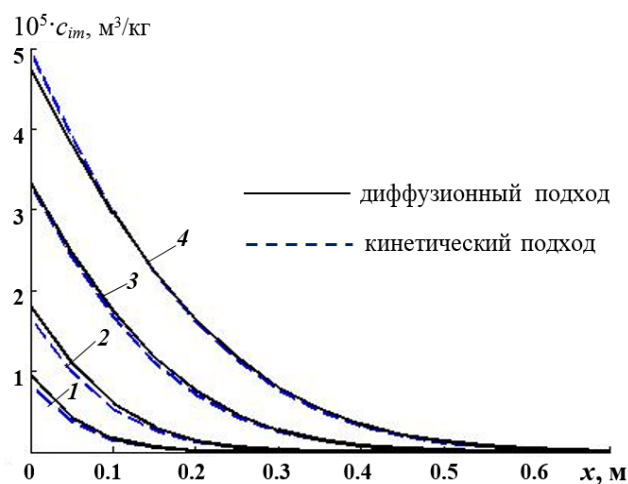


Рис.6. Профили концентраций  $c_{im}$ , определенные с использованием кинетического и диффузионного подходов, 1 -  $t = 450 \text{ с}$ , 2 -  $t = 900 \text{ с}$ , 3 -  $t = 1800 \text{ с}$ , 4 -  $t = 2700 \text{ с}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе на тему «Гидродинамические задачи переноса вещества в агрегированных пористых средах», сводятся к следующим выводам:

1. Составлена математическая модель процесса переноса веществ в неоднородной пористой среде с использованием двух подходов: диффузионный и кинетический. Определено значение коэффициента массопереноса, для которого оба подхода дают близкие результаты.

2. Рассмотрена задача переноса вещества с учетом адсорбционных явлений (линейная равновесная, линейная неравновесная, нелинейная равновесная и нелинейная неравновесная адсорбция) в горизонтально установленной цилиндрической пористой среде с центральной цилиндрической макропорой. Анализирован перенос вещества для двух случаев: на основе диффузионного уравнения и кинетического уравнения массопереноса. Найдены такие значения коэффициента массопереноса для всех вышеуказанных случаев адсорбционных явлений, для которых оба подхода дают близкие результаты.

3. Определены распределение давления, поле скоростей фильтрации, концентрация вещества в цилиндрической двухслойной среде с учетом неоднородности распределения поля скоростей фильтрации.

4. Показано значительное влияние проницаемости на распределение давления и скорости жидкости в пористой среде. Наличие зон с различными характеристиками существенно меняет как фильтрационные характеристики среды, так и параметры переноса вещества. Неоднородность распределения поля скоростей фильтрации существенно меняет общую картину переноса.

5. Решена задача переноса вещества в цилиндрической двухзонной среде с учетом неоднородного поля скоростей фильтрации в случае линейной (равновесной и неравновесной) и нелинейной (равновесной и неравновесной) адсорбции. Показано, что при переносе вещества с учетом адсорбционных явлений продвижение поля относительной концентрации замедляется.

6. Поставлены и численно решены коэффициентные обратные задачи переноса вещества в среде, состоящей из макропористой и микропористой цилиндрических зон, без учета и с учетом адсорбции. Путем решения соответствующих прямых задач на основе диффузионного подхода подготовлены «исходные данные» для решения обратных задач по определению коэффициента массопереноса в кинетическом уравнении. Решены также прямые задачи на основе кинетического подхода с использованием найденных решений обратных задач и показано, что диффузионные и кинетический подходы дают близкие результаты.

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

---

**SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

**SULAYMONOV FOZIL URALOVICH**

**HYDRODYNAMIC PROBLEMS FOR MASS TRANSPORT  
IN AGGREGATED POROUS MEDIA**

**01.02.05 – Fluid and gas mechanics**

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

**Samarkand-2019**

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 PhD/FM126.

The dissertation has been prepared at Samarkand State University.

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

**Scientific supervisor:** **Khuzhayorov Bakhtiyor Khuzhayorovich**  
Doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Official opponents:** **Malikov Zafar Mamatkulovich**  
Doctor of technical sciences

**Djabborov Mamasoli Sodikovich**  
Candidate of physical and mathematical sciences, docent


**Leading organization:** **Scientific and innovation center of information and communication technologies at the Tashkent university of information technologies**


Defense will take place « 17 » may 2019 at 11<sup>00</sup> at the meeting of Scientific Council number DSc.30.08.2018.FM/T.02.09 at Samarkand State University. (Address: University str. 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, tel.: (+99866) 239-11-40, fax: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: [devonxona@samdu.uz](mailto:devonxona@samdu.uz)).


Dissertation is possible to review in Information-resource center at Samarkand State University (is registered № 27) (Address: University str. 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, tel: (+99866) 231-06-32).

Abstract of dissertation sent out on « 3 » may 2019 year  
(Mailing report № 3 on « 3 » may 2019 year)



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

  
**A. Abdirashidov**  
Scientific secretary of scientific council  
on award of scientific degrees,  
Doctor of physical and mathematical sciences, Docent

  
**J. A. Akilov**  
Vice-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 research work** is improving the mathematical model of the solute transport in an aggregated porous media with a certain geometry, taking into account adsorption phenomena and filtration process of a non-homogeneous fluid in a coaxial cylindrical porous medium, taking into account the non-homogeneous distribution of the filtration velocity field as well as the development of numerical algorithms for solving problems.

**The object of the research work** is a cylindrical porous medium with a central cylindrical macropore.

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

the problem of mass transfer in a non-homogeneous cylindrical medium has been considered and solved on the basis of diffusion and kinetic approaches. The value of the coefficient of mass transfer in the kinetic equation, for which both approaches give similar results, is determined. The values of mass transfer coefficient were determined taking into account adsorption (linear, nonlinear, equilibrium, non-equilibrium), the effect of adsorption on the mass transfer in various media;

mathematical model of fluid motion and mass transfer in a two-zone cylindrical porous medium is improved taking into account the non-homogeneous distribution of the filtration velocity field without taking into account and taking into account adsorption, an effective numerical algorithm for solving the problem was developed;

the characteristic features of the dynamics of mass transfer and fluid flow in non-homogeneous media have been established;

The values of the mass transfer coefficient in the kinetic equation are determined by solving the inverse coefficient problem for which the diffusion and kinetic approaches give close results.

**Implementation of the research results.** The results of the research: software products, mathematical models, numerical algorithms developed according to improved models of the processes of fluid motion and substance transfer in non-homogeneous porous media have been used:

programs and methods for solving models of fluid flow and mass transfer in a heterogeneous porous medium taking into account mass transfer with the environment were used to evaluate the distribution of pollution and sediments that come with water, to determine the volume and orization of the reservoir at the Jizzakh irrigation system "Sirdarya-Zarafshan" in filling with water through (reference number 03/20-2997 of December 25, 2018 of the Ministry of Water Resources of the Republic of Uzbekistan). The results of scientific research make it possible to increase by 7-10% the accuracy of calculations and estimation of the hydrodynamic parameters of the infiltration process when using, storing water and filling up the storages;

programs and algorithms for improved calculations of the influence of medium heterogeneity and mass transfer to the external environment from a two-zone heterogeneous porous medium were used to evaluate the clogging phenomenon of the muddy bottom of the Jizzakh reservoir (reference number 03/20-2997 of December 25, 2018 of the Ministry of Water Management of the Republic of Uzbekistan). The

results of scientific studies make it possible to increase by 10-15% the efficiency of used engineering calculations,

programs and algorithms for calculating the transfer of substances in a two-zone environment with nonlinear kinetics were used to calculate the distribution along the coastal length of muddy bottom sediments in terms of digging in the Jizzakh reservoir (reference number 03/20-2997 of December 25, 2018 of the Ministry of Water Management of the Republic of Uzbekistan). The research results provide an opportunity to increase the efficiency of used engineering calculations by 5-7%;

The numerical algorithm and the software product “Calculation of the transfer of substances into a heterogeneous cylindrical porous medium with regard to adsorption” were used in the framework of foreign research grant 92-2015-03 (A mobile irrigation system for greenhouse) to simulate and study the distribution of fertilizers in the filtration process (University of Nilai, Malaysia, reference dated November 13, 2018). As a result, data were obtained on the distribution of the concentration of fertilizers and the solution of differential equations, taking into account the equilibrium and non-equilibrium phenomena of adsorption with linear and non-linear transfer of substances.

**Publication of research results.** On the topic of the thesis 22 scientific papers were published. Of these, 6 scientific articles, 2 in foreign, 4 in national journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of doctoral theses.

**The structure and volume of the thesis.** The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusion and bibliography. The volume of the thesis is 105 pages.

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

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Сулаймонов Ф.У. Задача переноса вещества в цилиндрической среде с цилиндрической макропорой // Узбекский журнал «Доклады Академии Наук Республики Узбекистан». -Ташкент, 2010. - №6. - С. 30-33 (01.00.00; № 7).
2. Сулаймонов Ф.У., Холияров Э.Ч. Коэффициентная обратная задача переноса вещества в среде, состоящей из макропористой и микропористой цилиндрических зон // Узбекский журнал «Проблемы механики». -Ташкент, 2013. - №2. - С. 75-78 (01.00.00; № 4).
3. Хужаёров Б.Х., Сулаймонов Ф.У., Холияров Э.Ч. Обратная коэффициентная задача переноса вещества в двухзонной среде с учетом равновесной адсорбции // Узбекский журнал “Проблемы механики”.- Ташкент 2014. - № 2. - С. 57-61 (01.00.00; № 4).
4. Khuzhayorov B.Kh., Fadzilah Md Ali, Sulaymonov F.U., Kholiyarov E.Ch. Inverse coefficient problem for mass transfer in two-zone cylindrical porous medium // AIP publishing, USA “AIP Conference Proceedings”. - New York 2016, 020028(1-7) p; (Scientific Journal Impact Factor=0.22).
5. Khuzhayorov B., Makhmudov J., Sulaymonov F. Solute transport with adsorption in cylindrical heterogeneous media // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. - India, 2018. Vol. 5, Issue 9. - P.6934-6943. (05.00.00; №8)
6. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Сулаймонов Ф.У. Фильтрация и перенос вещества в цилиндрической двухзонной среде с учетом неоднородности поля скоростей фильтрации // Узбекский журнал “Проблемы механики”. – Ташкент, 2018. - № 4. - С. 43-48 (01.00.00; № 4).

**II бўлим (II часть; II part)**

7. Сулаймонов Ф.У. Перенос веществ в среде, содержащей большую цилиндрическую макропору // “Табиий фанларнинг долзарб муаммолари”, Республика илмий анжумани материаллари. – Самарқанд, 2008. – 124-125 б.
8. Mustafakulov J.A., Sulaymonov F.U. Modelling of passive and active solute transport in structured porous media with contrast characteristics // Abstracts of the third congress of the world mathematical society of Turkic countries, Almaty, Kazakhstan, June 30-July 4, 2009. Vol.2. –P. 169.
9. Махмудов Ж.М., Сулаймонов Ф.У. Решение задачи переноса веществ в цилиндрической среде с цилиндрической макропорой // Материалы междуна-

- родной научно-технической конференция «Современные проблемы механики». - Ташкент, 23-24 октября 2009 г. - С.107-110.
10. Мустафакулов Ж.А., Сулаймонов Ф.У. Моделирование процессов переноса загрязняющих веществ при заводнении трещиновато-пористых пластов // Республиканская научно-практическая конференция «Проблемы разработки месторождений углеводородов и пути их решения». - Ташкент, 16-17 сентября 2010 г. - С.44-45.
  11. Сулаймонов Ф.У. Перенос загрязняющих веществ при заводнении нефтяных пластов // Республиканская научно-практическая конференция «Проблемы разработки месторождений углеводородов и пути их решения». - Ташкент, 16-17 сентября 2010 г. - С.45-46.
  12. Сулаймонов Ф.У., Мустафакулов Ж.А. Численное моделирование переноса вещества в среде, состоящей из макропористой и микропористой цилиндрических зон с учетом адсорбции // «Замонавий математиканинг долзарб муаммолари» Материалы Республиканской научной конференции. - Карши, 22-23 апреля 2011 й. - С.498-501.
  13. Сулаймонов Ф.У., Махмудов Ж.М. Решение задачи переноса вещества в среде, состоящей из микропористой и макропористой цилиндрических зон с учетом адсорбции // «Современные проблемы механики грунтов и сложных реологических систем» Материалы международной научно-технической конференции. - Самарканд, 19-20 апреля 2013 г. - С. 186-188.
  14. Khuzhayorov B., Makhmudov J., Sulaymonov F. Mathematical Modelling of Solute Transport in a Medium, Consisting of Micro-porous and Macro-porous Zones // Abstract Proceedings "International seminar on mathematics and natural sciences". - Samarkand, ISMNS 2013. - Pp. 43-44.
  15. Сулаймонов Ф.У., Холияров Э.Ч. Коэффициентная обратная задача переноса вещества в среде, состоящей из макропористой и микропористой цилиндрических зон // "Олий ва ўрта махсус, касб-хунара таълимида аниқ ва табиий фанларнинг ўзаро алоқадорлик ва узвийлик масалалари" Республика илмий-назарий анжумани материаллари. - Қарши, 28-29 март 2014 й. - С.336-338.
  16. Sulaymonov F.U., Kholiyarov E.Ch. Coefficient inverse problem for solute transport in a cylindrical non-homogeneous porous medium // The V Congress of Turkic World Mathematicians, Bulan-Sogottu, Kyrgyzstan, June 5-7, 2014. - Pp 158.
  17. Хужаёров Б.Х., Сулаймонов Ф.У., Холияров Э.Ч. Задача определения кинетического коэффициента переноса вещества в двухзонной среде с учетом равновесной адсорбции // "Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий—Аль-Хоразми 2014" Труды международной конференции. - Самарканд, 15-17 сентября 2014 г. - С.169-172.
  18. Махмудов Ж.М., Сулаймонов Ф.У. Решения задачи переноса вещества в цилиндрической двухслойной среде // «Современные методы математиче-

- ской физики и их приложения” Материалы Республиканской научной конференции. - Ташкент, 15-17 апреля 2015 г. - С. 183-185.
19. Сулаймонов Ф.У., Холияров Э.Ч., Хайдаров О.Ш. Обратная коэффициентная задача переноса вещества в двухзонной цилиндрической пористой среде // «Актуальные проблемы математики» Материалы Республиканской научно-практической конференции. - Андижан, 17 мая 2016 г. - С. 204-207.
  20. Хужаёров Б.Х., Холияров Э.Ч., Сулаймонов Ф.У. Определения коэффициентов пьезопроводности и времени релаксации градиента давления на основе решения обратных задач // Материалы Международной научно-технической конференции «Перспективы применения инновационных технологий в сфере архитектуры и строительства». - Самарканд, 27-28 мая 2016 г. - С.107-111.
  21. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Сулаймонов Ф.У., Баракаев А.М. Уравнение пререноса вещества в неоднородной цилиндрической пористой среде с учетом адсорбционных явлений // Материалы Республиканской научной конференции с участием зарубежных ученых «Актуальные проблемы динамических систем и их приложений». - Ташкент, 1-3 мая 2017 г. - С.323-324.
  22. Махмудов Ж.М., Сулаймонов Ф.У., Баракаев А.М., Перенос вещества в неоднородной пористой среде с учетом неравновесной адсорбции // Международный научный журнал «Молодой ученый» №23, 2017, Казань, Республика Татарстан, Россия. - С.87-90.
  23. Хужаёров Б.Х., Сулаймонов Ф.У. Расчет переноса веществ в неоднородной цилиндрической пористой среде с учетом адсорбции, № DGU 04924, Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлиги. - Тошкент, 2017.

Автореферат “Самарқанд давлат университети таҳририй-нашриёт бўлими”  
таҳририясида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус, инглиз (резюме) тиллардаги  
матнлари мослиги текширилди (22.04.2019 й.).

Гувоҳнома №18-4025.

22.04.2019 йилда босишга рухсат этилди.  
Шартли босма табағи 2,75. Қоғоз бичими 60x84<sub>1/16</sub>.  
“Times” гарнитураси. Адади 100 нусха. Буюртма №6/1.

---

“Nafis poligraf servis” МЧЖ босмахонасида чоп этилди.  
Манзил: Самарқанд ш., Буюк ипак йўли кўчаси, 67-А.