

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМІЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.30.08.2018.FM/T.02.09 РАҚАМЛИ ИЛМІЙ КЕНГАШ

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

МАХМУДОВ ЖАМОЛ МАХМУД ЎҒЛИ

БИР ЖИНСЛИ БЎЛМАГАН СУЮҚЛИКЛАРНИНГ ҒОВАК
МУҲИТЛАРДА СИЗИШИНИНГ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАРИНИ
ТАКОМИЛЛАШТИРИШ ВА ТАДҚИҚ ЭТИШ

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАН ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Самарқанд – 2019

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of abstract doctoral (DSc) dissertation

Махмудов Жамол Махмуд ўғли

Бир жинсли бўлмаган суюқликларнинг ғовак муҳитларда сизишининг
математик моделларини такомиллаштириш ва тадқиқ этиш3

Махмудов Жамол Махмуд угли

Усовершенствование и анализ математических моделей фильтрации
неоднородных жидкостей в пористых средах29

Makhmudov Jamol Makhmud ugli

Improvement and analysis of mathematical models of filtration of
non-homogeneous liquids in porous media.....55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works59

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.30.08.2018.FM/T.02.09 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

МАХМУДОВ ЖАМОЛ МАХМУД ЎҒЛИ

БИР ЖИНСЛИ БЎЛМАГАН СУЮҚЛИКЛАРНИНГ ҒОВАК
МУҲИТЛАРДА СИЗИШИНИНГ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАРИНИ
ТАКОМИЛЛАШТИРИШ ВА ТАДҚИҚ ЭТИШ

01.02.05 – Суюқлик ва газ механикаси

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАН ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Самарқанд – 2019

Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.3.DSc/FM94 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Самарқанд давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.samdu.uz) ва «Ziynet» Ахборот таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Хўжаёров Бахтиёр Хўжаёрович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Нормуродов Чори Бегалиевич
физика-математика фанлари доктори

Равшанов Нормаммад
техника фанлари доктори, профессор

Хужаев Исмаилов Кушаевич
техника фанлари доктори, катта илмий ходим

Етакчи ташкилот:

Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш мухандислари институти

Диссертация ҳимояси Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.30.08.2018.FM/T.02.09 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «24» май соат 14⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 140104, Самарқанд ш., Университет хиёбони, 15-уй. Тел.: (+99866) 239-11-40, факс: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, e-mail: devonxona@samdu.uz).

Диссертация билан Самарқанд давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (28 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 140104, Самарқанд ш., Университет хиёбони, 15-уй. Тел.: (+99866) 239-17-25.

Диссертация автореферати 2019 йил «4» май куни тарқатилди.
(2019 йил «3» май даги 5 рақамли реестр баённомаси).



Р.И.Халмуродов
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 (фан доктори (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда нефт-газни қазиб олиш ва уни қайта ишлаш саноати, кимёвий технология, экология ва бошқа кўпгина соҳаларга бевосита боғлиқ бўлган ғовак муҳитларда дисперс тизимлар сизиши масалаларига катта эътибор қаратилмоқда. Шу жиҳатдан АҚШ, Австралия, Россия Федерацияси ва бошқа ривожланган мамлакатларда, жумладан нефт конларини иккиламчи ва учламчи усулларда эксплуатация қилишнинг замонавий технологияларида биржинслимас мураккаб тузилишли маҳсулдор қатламларда биржинслимас суюқликлар сизиши математик моделлари кенг қўлланилмоқда. Бу борада макроскопик биржинслимас ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар сизиши ва модда кўчиши жараёнлари математик моделлари ва уларни сонли тадқиқ этиш усуллари ичимлик ва оқава сувларни тозалаш, нефт-газ конлари самарадорлигини ошириш, мураккаб технологик, иссиқлик ва модда алмашинуви жараёнларни бошқариш ва лойиҳалашнинг назарий асосини такомиллаштиришда муҳим аҳамият касб этмоқда.

Жаҳонда макроскопик биржинслимас ғовак муҳитда биржинслимас суюқлик сизиши жараёнини, суюқлик таркибидаги қаттиқ заррачаларнинг ғовак муҳит скелети билан ўзаро таъсирлашувини, ғоваклар ичида ҳосил бўлган чўкманинг сизиш жараёнига таъсирини тадқиқ қилишга йўналтирилган илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Бу йўналишда, жумладан ғовак муҳитларда суюқлик ва газ сизиши жараёнларининг математик моделларини ва замонавий ҳисоблаш усулларини такомиллаштириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Шу билан бирга макроскопик биржинслимас ғовак муҳитларда биржинслимас суюқлик сизиши ва модда кўчишининг такомиллашган математик моделларини, самарали ҳисоблаш алгоритмларини ва дастурларини ишлаб чиқиш зарур ҳисобланмоқда.

Республикамизда амалий аҳамиятга эга бўлган ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар сизиши ва модда кўчиши билан боғлиқ мураккаб гидродинамик жараёнларни математик моделлаштириш, сонли модели ва алгоритмини яратиш ҳамда амалиётга жорий қилиш чора-тадбирларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...ишлаб чиқаришни ..., техник ва технологик жиҳатдан янгилаш ..., юқори технологияли қайта ишлаш тармоқларини, энг аввало, маҳаллий хомашё ресурсларини чуқур қайта ишлаш асосида юқори қўшимча қийматли тайёр маҳсулот ишлаб чиқаришни жадал ривожлантиришга қаратилган сифат жиҳатидан янги босқичга ўтказиш орқали саноатни янада модернизация ва диверсификация қилиш; ... тежамкор ва самарали замонавий технологияларни босқичма-босқич жорий этиш ...»¹ вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш, жумладан оқава ва ичимлик сувларини тозалаш, нефт-

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ-4947-сон Фармони.

газ қатламларига иккиламчи ва учламчи усуллар билан таъсир қилиш жараёнларини математик моделларини такомиллаштириш, ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш имкониятини берувчи сонли ечишнинг самарали алгоритм ва дастурий таъминотини яратиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 4 майдаги ПҚ-2954-сон «2017-2021 йилларда ер ости сувлари захираларидан оқилона фойдаланишни назорат қилиш ва ҳисобга олишни тартибга солиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 30 июндаги ПҚ-3107-сон «Нефть-газ соҳасининг бошқарув тизимини такомиллаштириш чора-тадбирлари 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 норматив-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.

Диссертациянинг мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи². Макроскопик биржинслимас ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар сизиши масалаларини ечиш учун математик моделлар, самарали сонли усуллар ишлаб чиқишга йўналтирилган илмий изланишлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, Louisiana State University, Massachusetts Institute of Technology, University of Southern California (АҚШ), Томск миллий тадқиқот политехника университети, Уралъ федерал университети, Қозон федерал университети, Россия давлат нефть ва газ университети, Уфа давлат нефть техникаси университети (Россия Федерацияси), Australian School of Petroleum (Австралия), Israel Institute of Technology (Исроил), Қозоқ миллий университети (Қозоғистон), ЎзР ФА Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти, Тошкент давлат техника университети, Самарқанд давлат университети (Ўзбекистон) кенг қамровли илмий-тадқиқотлар олиб борилмоқда.

² Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи www.mathnet.ru/; <http://www.mit.edu/>; <https://www.usc.edu/>; <https://ecms.adelaide.edu.au/petroleum-engineering/>; <https://www.technion.ac.il/en/technion-israel-institute-of-technology/>; <http://www.ou.edu/>; <https://www.syracuse.edu/>; <https://www.lsu.edu/>; <https://link.springer.com/search?query=porous+media>; www.dissercat.com/catalog/fiziko-matematiches-kie-nauki, <https://www.researchgate.net/publication>; Mechanistic Model for Nanoparticle Retention in Porous Media // Transport in Porous Media. November 2016, Volume 115, Issue 2, pp 387–406, <https://scholar.google.com/>; Mathematical modelling of fines migration in geothermal reservoirs // Geothermics, 2016 No.59, pp. 123–133, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894710006443>; Deep-bed filtration model with multistage deposition kinetics // Chemical Engineering Journal. 2010. No. 163, pp. 78-85 ва бошқа манбалардан фойдаланилган.

Ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар сизиши ва модда кўчиши, хусусан, суспензиядаги каттик заррачаларнинг ғовак муҳит сизиш-сиғим хоссаларига таъсири жараёнларини математик моделлаштириш, сизиш ва кўчиш масалаларини ечиш учун адекват математик моделлар, самарали ҳисоблаш алгоритмлар ва дастурлар ишлаб чиқиш бўйича жаҳонда олиб борилаётган тадқиқотлар асосида қуйидаги натижалар олинган: ер ости резервуарларининг ифлосланиш жараёнларини математик моделлари яратилган (The University of Oklahoma, АҚШ), турли фильтрацион муҳитларда суспензиялар сизиши жараёнлари математик моделлари яратилган (Syracuse University, АҚШ), ифлосланган сувларни филтрлаб тозалаш жараёни математик моделлари ва дастурий таъминоти ишлаб чиқилган (Шимолий технология институти, Россия), коллоид, икки фазали, икки компонентали суспензияларнинг ғовак ва ёриқ-ғовак муҳитларда сизиши, сувни тозалаш ва қайта ишлаш, саноат сизиши жараёнларининг математик моделлари ишлаб чиқилган (Australian School of Petroleum, Австралия), ер ости сувлари ҳаракати ва ифлосланган моддалар кўчиши жараёнларини математик ва сонли моделлари яратилган (Israel Institute of Technology, Исроил), ғовак муҳитларда бир ва кўп фазали суюқликларнинг сизиши ва моддалар кўчиши жараёнлари математик моделлари ва самарали сонли ечиш алгоритмлари ишлаб чиқилган (Самарқанд давлат университети, Тошкент ахборот технологиялари университети, Ўзбекистон).

Дунёда ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар сизиши ва модда кўчишини тавсифловчи назария ва математик моделлаштириш билан боғлиқ устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: ғовак ва ёриқ-ғовак муҳитларда кўп фазали, кўп компонентали суюқликларнинг сизиши жараёнларининг математик моделларини ишлаб чиқиш; ғовак муҳитларда модданинг аномал кўчиши ва биржинслимас суюқликлар сизиши жараёнларини каср тартибли хусусий ҳосилали дифференциал тенгламалар ёрдамида математик ва сонли моделлаштириш; фрактал тузилишли ғовак муҳитда моддалар кўчиши ва суспензиялар сизиши жараёнларининг математик моделларини ишлаб чиқиш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Охириги йилларда биржинслимас суюқликлар сизиши ва модда кўчиши жараёнларини математик моделлаштириш масалалари асосан хорижда жадал ривожланмоқда. Кам концентрацияли суспензияларнинг сизиш жараёнларини математик моделлаштириш масалалари биринчи бўлиб Ю.М.Шехтманнинг ишида тизимли ва батафсил таҳлил қилинган. Сўнги йилларда ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар сизиши ва модда кўчиши жараёнларининг математик моделларини тузиш ва такомиллаштириш бўйича К.Н.Coats, B.D.Smith, M.Th.van Genuchten, P.S.C.Rao, H.M.Selim, C.Tien, K.Ives, M.Sharma, M.Elimelech, J.Bear, F.Civan, A.Zamani, P.Bedrikovetsky, J.Herzig, Г.Баренблат, А.Х.Мирзаджанзаде, Е.В.Венецианов, К.С.Басниев, Р.И.Нигматулин, М.Д.Носков ва бошқа олимларнинг илмий ишларида қаралган.

Ғовак муҳитларда суюқлик ва газлар сизиши жараёнларини тадқиқ қилиш учун математик моделлар ва ҳисоблаш усуллари ишлаб чиқиш бир қатор ўзбек олимлари, жумладан, Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Ж.Ф.Файзуллаев, Н.М.Муҳидинов, Р.Садуллаев, И.Алимов, Ж.Акилов, Б.Х.Хўжаёров, Ч.Б.Нормуродов, И.К.Хўжаев, Н.Равшанов, Ш.Каюмов, В.Ф.Бурнашев ва бошқа олимлар салмоқли илмий натижаларга эришишган.

Таъкидлаш керакки, биржинслимас суюқликлар, хусусан суспензиялар сизишининг қатор мавжуд моделлари жараённинг асосий хусусиятларини ифодалайди. Феноменологик моделлар қолган моделларга қараганда кенг тарқалган. Шунга қарамадан, макроскопик биржинслимас муҳитларда суспензия сизиши ва мураккаб реал технологик жараёнларни башоратлаш ва тадқиқ этиш имкониятини берувчи адекват феноменологик моделлар ишлаб чиқиш муаммоси батафсил ўрганилмаган. Амалга оширилган кўплаб илмий тадқиқотларда макроскопик биржинслимас ғовак муҳитларда суспензияларнинг сизиши жараёнларида динамик омиллар, ғовак муҳит ҳаракатсиз суюқлик соҳасининг ҳаракатдаги суюқлик соҳаси сизиш кўрсаткичларига таъсири ҳисобга олинмаган. Жумладан, ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқликли ғовак муҳитларда суспензияларнинг кольматацион-суффозион сизиши билан боғлиқ тадқиқотлар етарлича олиб борилмаган. Бундан ташқари, чўкма консолидациясини, суспензиянинг икки заррачалигини ҳисобга олиб чўкма ҳосил қилувчи суспензия сизиши математик моделлари ишлаб чиқилмаган ҳамда суспензиядаги ташувчи фазанинг сиқилувчанлиги муҳитнинг қолган фазалар билан тўйинганлигига таъсири етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси 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 «Ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар сизиши гидродинамик моделларини тузиш ва тадқиқ этиш» (2008-2011) ва №Ф4-Ф078 «Ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар сизиши ва сузилишининг гидродинамик масалалари» (2012-2016) мавзудаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади ғовак муҳитларда унинг макроскопик биржинслимаслиги ҳисобга олган ҳолда биржинслимас суюқликлар сизиши, сизиш тезлиги майдонининг биржинслимас тақсимланишини ҳисобга олган ҳолда дисперс суюқликлар сизиши, ташувчи фазанинг сиқилувчанлиги ва чўкма консолидациясини ҳисобга олган ҳолда суспензиялар сизиши, турли тузилишли чўкма ҳосил бўлишини ҳисобга олган ҳолда кўп компонентли суспензиялар сизишининг такомиллаштирилган математик моделларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

чегаравий суффозион босим градиентини ҳисобга олиб (ҳисобга олмасдан) ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз (ёки кам ҳаракатдаги) суюқликли икки

ўлчовли ғовак муҳитда дисперс суюқлик сизиши ва модда кўчиши математик моделларини ишлаб чиқиш ва сонли тадқиқ этиш;

Ю.М.Шехтманнинг умумлашган баланс тенгламаси асосида икки соҳали ғовак муҳитда суспензиянинг кольматацион-суффозион сизиши математик моделини такомиллаштириш ва сонли тадқиқ этиш;

фильтр ичида чўкма ҳосил қилиб кам сиқилувчи суспензия сизиши математик моделини ишлаб чиқиш ва сонли тадқиқ этиш;

консолидацияланадиган чўкма ҳосил қилувчи суспензия сизиши математик моделини ишлаб чиқиш ва сонли тадқиқ этиш;

ғовак муҳитда тузилиши ва хоссалари бир-биридан фарқ қилувчи икки турли чўкма ҳосил бўлувчи икки компонентли суспензия ҳаракати математик моделини ишлаб чиқиш ва сонли тадқиқ қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида биржинслимас суюқликлар, хусусан, суспензиялар сизилувчи ғовак муҳитлар олинган.

Тадқиқотнинг предмети ғовак муҳитда суспензия сизиши ва модда кўчиши жараёнлари математик моделлари, ҳисоблаш алгоритмлари ва гидродинамик жараёнлар ўзгариш қонуниятларини ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқотда кўп фазали муҳитлар механикаси ва физик-кимёвий гидродинамика усуллари, ғовак муҳитларда сизиш назариясининг асосий тенгламалари, математик ва сонли моделлаштириш усулларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги:

ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз (ёки кам ҳаракатдаги) суюқликли икки ўлчовли ғовак муҳитда биржинслимас суюқликнинг кольматацион-суффозион сизиши математик модели чегаравий суффозион босим градиенти ҳисобга олинган ва олинмаган ҳолларда такомиллаштирилган;

ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқликли ғовак муҳитда дисперс суюқликнинг кольматацион-суффозион сизиши математик модели Ю.М.Шехтманнинг умумлашган тенгламаси асосида такомиллаштирилган;

суспензиядаги ташувчи фазанинг сиқилувчанлигини ҳисобга олган ҳолда ғовак муҳитда суспензия сизиш математик модели ишлаб чиқилган;

чўкма консолидациясини ҳисобга олиб суспензия сизишининг математик модели ишлаб чиқилган ва консолидациянинг муҳит сизиш кўрсаткичларига сезиларли таъсир этиши аниқланган;

кўп фазали муҳитлар механикаси принципларига асосланиб ғовак муҳитда турли тузилишли чўкма ҳосил қилиб икки компонентли суспензия сизиши математик моделлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқликли икки соҳали ғовак муҳитларда суспензия сизиши ва модда кўчиши жараёнлари математик моделлари такомиллаштирилган ва ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

ғовак муҳитда суюқлик сиқилувчанлигини ҳисобга олиб суспензия сизиши масаласининг самарали сонли ечиш алгоритми ишлаб чиқилган;

ғовак муҳитда чўкма консолидациясини ҳисобга олиб суспензия сизиши масаласини сонли ечиш алгоритми ишлаб чиқилган;

ғовак муҳитда турли тузилишли чўкма ҳосил қилиб икки компонентали суспензия сизиши масаласини ечиш учун дастурий восита ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги суспензия сизиши ва модда кўчиши тенгламаларини тузишда туташ муҳитлар механикаси фундаментал принципларидан – масса баланси қонунлари, Дарси қонунидан фойдаланилган. Кольматация ва суффозия ҳодисалари ҳисобидан ғовак фазо тузилиши ўзгариши кинетика тенгламаларини асослашда ҳар бир фараз пухта асосланган феноменологик ёндашувдан фойдаланилган. Икки кўринишли чўкма ҳосил қилиб суспензия сизиши математик моделини ишлаб чиқишда кўп фазали тизимлар механикаси принципларидан фойдаланилган. Масалаларни сонли ечишда уларнинг турғунлиги текширилган. Олинган сонли натижалар асосида физик таҳлил ўтказилган ва уларнинг реал гидродинамик жараёнга мослиги баҳоланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти ғовак муҳитда суспензиялар сизиши назариясининг ривожланишига ҳисса қўшадаган турли динамик омилларни, кўп компонентали суспензиялар сизишида турли тузилишли чўкма ҳосил бўлишини ҳисобга олиб назарий асослар ва математик моделлар ишлаб чиқиш ҳамда сизиш масалаларни сонли ечишнинг самарали алгоритмларини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти, олинган натижалардан фойдаланиб ичимлик ва оқава сувларини тозалашда, нефт ва газни иккиламчи ва учламчи усуллар билан қазиб олишда, хусусан, кислотали таъсир қилишда эрмаган заррачаларнинг қатлам ғовакларига ўтириб қолиши жараёнларини моделлаштиришда, биржинсли ва макроскопик биржинслимас ғовак муҳитларда суспензия сизиши ва модда кўчиши юз берадиган кўплаб технологик жараёнлар ва гидрологияда жараёнларни сифат ва миқдор жиҳатдан таҳлил қилишда фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар сизишининг такомиллаштирилган математик моделлари, уларни сонли таҳлили учун самарали ҳисоблаш алгоритмлари асосида:

ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқликли икки соҳали ғовак муҳитда суспензия сизишининг такомиллаштирилган математик моделларидан БВ-М-Ф4-001 рақамли «Мураккаб иссиқлик ва модда алмашинувига доир кўп ўлчовли масалаларнинг математик моделлари ва тақсимланган самарали ҳисоблаш алгоритмлари» фундаментал грант лойиҳасида мураккаб кўп ўлчамли иссиқлик ва масса алмашинуви масалалари моделларини такомиллаштиришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2019 йил 15 январдаги 33-8/238-сон маълумотномаси). Натижада мураккаб

иссиқлик ва масса алмашинуви жараёнларининг кўп ўлчамли масалалари математик моделларини такомиллаштириш имконини берган;

чўкма консолидациясини ҳисобга олиб суспензия сизиши ва икки компоненти суспензия сизиши масалаларини ечишнинг ишлаб чиқилган ҳисоблаш алгоритмларидан БВ-М-Ф4-001 рақамли «Мураккаб иссиқлик ва модда алмашинувига доир кўп ўлчовли масалаларнинг математик моделлари ва тақсимланган самарали ҳисоблаш алгоритмлари» фундаментал грант лойиҳасида мураккаб кўп ўлчамли иссиқлик ва масса алмашинувига доир масалаларни ечишнинг алгоритмик усуллари ишлаб чиқишда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2019 йил 15 январдаги 33-8/238-сон маълумотномаси). Натижада ҳисоблаш алгоритмлари ғовак муҳитларда мураккаб масса кўчиши масалаларини ечишда ҳисоблаш вақтини сезиларли даражада камайтириш имконини берган;

ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликларнинг такомиллаштирилган математик моделлари ва ҳисоблаш алгоритмлари «Ўзнефтьгазказибчиқариш» АЖ объектларида Шимолий Ўртабулоқ (№ 3 қудук), Жанубий Кемачи (№118 қудук), Шўртепа (№102 қудук) ва Сариқум (№22 қудук) конларида иккиламчи ва учламчи усуллар билан таъсир қилишда қатламнинг сизиш-сиғим хоссаларини ҳисоблаш учун жорий этилган («Ўзбекнефтьгаз» АЖнинг 2018 йил 18 апрелдаги №02/14-2-477-сон маълумотномаси). Натижада қудукларга кислотали ишлов беришда эримаган зарраларнинг қатлам ғовакларига ўтириб қолиши жараёнларини ҳисобга олиб геолого-техник чора-тадбирларнинг оптимал режасини ишлаб чиқиш имконини берган;

ғовак муҳитда модда кўчиши ва суспензия сизишининг такомиллаштирилган математик моделларидан етакчи хорижий илмий журналларда: (Journal of Hydrology, Т.468-469 (2012), IF=1.832) инфильтрация ва адсорбция жараёнлари математик моделларини келтириб чиқаришда, (Journal of Porous Media, 4 (2014), IF=0.504) сув билан тўйинган ғовак муҳитларда температура тарқалишини аниқлашда, (Journal of Porous Media, 5 (2014), IF=0.504) сизиш коэффициентининг суспензия концентрацияси ва сизиш тезлигидан боғлиқлигини аниқлашда фойдаланилган. Илмий натижаларнинг қўлланилиши инфильтрация ва адсорбция тенгламаларини келтириб чиқариш, муҳит сизиш кўрсаткичлари ва температура тарқалиш майдонини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Ушбу тадқиқот натижалари 3 та халқаро ва 18 та республика илмий-амалий конференцияларда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича 35 та илмий иш чоп этилган. Шундан, 1 та монография, докторлик диссертациялари асосий натижалари чоп қилиш учун Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 12 та илмий мақола, 3 таси хорижий ва 9 таси республика нашрларида чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация 183 бетдан иборат бўлиб, кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, иловадан ташкил топган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, диссертация бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи баён этилган, тадқиқотнинг мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги, илмий ва амалий аҳамияти ёритилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, ишнинг апробацияси, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқликли ғовак муҳитда кольматацион-суффозион сизиш”** деб номланган биринчи бобида ғовак муҳитларда биржинслимас суюқликлар ҳаракатини моделлаштиришда фойдаланилган ёндашувлар ҳақида қисқача маълумотлар келтирилган. Шу вақтгача қўлланилган ёндашувларнинг умумий характерли хусусиятлари аниқланган. Хусусан, моделлаштиришнинг феноменологик ёндашувлари модда баланси, заррачаларнинг ўтириб қолиш жараёнлари кинетикаси (ғовакли ҳажмнинг заррачалар билан тўлиши характерининг ўзгариши, сорбция, десорбция ва бошқа) тенгламаларидан, шунингдек умумлашган Дарси конунидан фойдаланишга асосланган. Шунга ўхшаш ёндашув ғовак муҳитларда дисперс тизимларнинг кольматацион-суффозион сизишини моделлаштириш жараёнида қўлланилган.

Диссертациянинг **“Ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқликли ғовак муҳитда модда кўчиши ва суюқлик сизишининг икки ўлчамли масалаларини ечиш”** деб номланган иккинчи бобида сизиш-сиғим хоссалари турлича бўлган икки соҳадан ташкил топган икки ўлчамли ғовак муҳитда модда кўчиши ва суспензия сизиши масалалари тадқиқ этилган. Муҳитга модда ва суюқлик юборилиши режимининг турли ҳоллари қаралган. Чегаравий суффозион босим градиенти (ЧСБГ) параметрини ҳисобга олиб ҳам масалалар қўйилган ва ечилган.

Нуктали манба ҳолида икки ўлчамли соҳада модда кўчиши ва суюқлик сизиши масаласи қаралди. Масаланинг тадқиқот соҳаси $R^+ \{0 \leq x < \infty, 0 \leq y \leq h\}$ ва $R^- \{0 \leq x < \infty, -\infty < y \leq 0\}$ соҳалардан ташкил топган. R^+ – ҳаракатдаги ҳамда R^- – ҳаракатсиз суюқлик соҳа деб қаралади. $t > 0$ дан бошлаб R^+ нинг чап чегарасининг марказидан, яъни $x = 0$, $y = h/2$ дан муаллақ қаттиқ заррачали c_0 концентрацияли суюқлик хайдалади, яъни

$$c = \begin{cases} c_0, & x = 0, \quad y = h/2, \\ 0, & x = 0, \quad y \neq h/2. \end{cases} \quad (1)$$

R^+ да ўзгармас u тезлик билан суюқлик ҳаракатланади. Шундай қилиб, R^+ да бўйлама ва кўндаланг диффузия билан биргаликда қаттиқ заррачанинг конвектив кўчиши содир бўлади.

R^+ соҳада колматацион-суффозион сизиш тенгламалар системаси ушбу кўринишда бўлади

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D_1 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \omega_1 (\varepsilon_0 - \varepsilon) |\nabla p| - \omega_2 \varepsilon c, \quad (3)$$

бунда c – модда концентрацияси, D_1, D_2 – бўйлама ва кўндаланг диффузия коэффициентлари, $\varepsilon_0, \varepsilon$ – бошланғич ва жорий ғовакликлар, ω_1, ω_2 – ғовак суффозияси ва колматацияси жадаллигини характерловчи коэффициентлар, $|\nabla p|$ – босим градиенти модули, t – вақт.

R^- да фақат бўйлама йўналиш бўйича модданинг диффузион кўчиши содир бўлади. Таъкидлаймизки, R^- да R^+ дан фарқли равишда бўйлама йўналиш 0 дан $-u$ га йўналган деб ҳисобланади.

R^- да модда кўчиши жараёни

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}, \quad (x, y) \in R^- \quad (4)$$

тенглама билан ифодаланади, бунда D_3 – эффектив диффузия коэффициенти.

R^+ да аралашма ҳаракати жараёни умумлашган Дарси қонунига бўйсинади

$$\vec{w} = -K(\varepsilon) \nabla p, \quad (5)$$

бунда $\vec{w}$ – сизиш тезлиги, p – босим, $K(\varepsilon)$ – сизиш коэффициенти.

$$w = u \cdot \varepsilon \text{ маълум боғланишни ва Карман-Козен } K(\varepsilon) = \frac{k_0 \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}, \quad k_0 = \text{const}$$

қонунини ҳисобга олиб босим градиенти учун муносабатни аниқлаймиз, яъни (5) дан

$$|\nabla p| = \frac{u(1 - \varepsilon)^2}{k_0 \varepsilon^2} \quad (6)$$

ни ҳосил қиламиз.

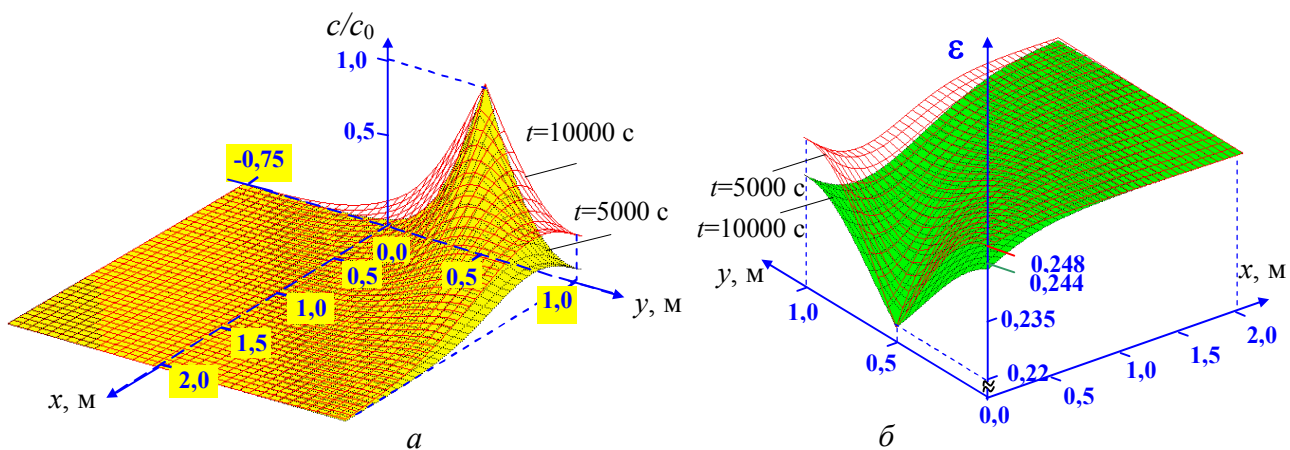
R^+ да $x \rightarrow \infty$ да ва R^- да $y \rightarrow -\infty$ бўлганда модда оқими бўлмайди деб қараймиз. Масалани тадқиқ этиш босқичида бу шартлар R^+ да $x = \infty$ га ва R^- да $y = -\infty$ га концентрация профиллари етиб бормайди ёки чексиз чегара ёпиқлигига мос келади.

Бошланғич ва чегаравий шартлар ҳамда (1) шарт билан бирга (2) – (4), (6) тенгламалар системасини ечиш учун чекли айирмалар усулидан фойдаланилди.

Параметрларнинг куйидаги қийматларида: $u = 6 \cdot 10^{-4}$ м/с, $k_0 = 10^{-2}$ м/(МПа·с), $\mu = 10^{-9}$ МПа·с, $h = 1$ м, $c_0 = 0,01$ ва $D_1, D_2, D_3, \omega_1, \omega_2$ ларнинг турли қийматларида ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди.

Ҳисоблаш натижалари кўрсатмоқдаги, колматацион-суффозион омиллар концентрация майдонининг тарқалишига сезиларли таъсир қилади. Суффозион омилларнинг пасайиши ва колматацион омилларнинг ошиши билан концентрацион сирт профилларининг тарқалиши орқада қолиши кузатилади.

R^+ соҳада конвекция ва диффузия (бўйлама ва кўндаланг) билан биргаликда колматацион-суффозион омиллар концентрация манбаси (сток) сифатида иштирок этадиган (1) тенглама ишлайди. Шунинг учун $y = h$ да монотон бўлмаган ўзгариш кузатилиши мумкин, номонотонлик суффозиянинг кучсизланиши ва колматациянинг кучайишида бирмунча аниқроқ кўринади (1,а-расм). R^+ да колматацион-суффозион омиллар ҳисобидан бошланғич қиймат ε_0 га нисбатан ε ғоваклик майдони камайиши ҳосил бўлади (1,б-расм). Суффозион омилларнинг кучсизланиши ва колматацион омилларнинг кучайиши ε нинг янада сезиларли камайишига олиб келади. ε нинг камайиши Карман-Козен қонунига мос равишда қатлам ўтказувчанлиги, шунингдек сизиш коэффициенти камайишига олиб келади.



1-расм. Нисбий концентрация c/c_0 (а) ва ғоваклик (б) сиртлари, бунда $D_1 = 5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $D_2 = 10^{-5}$ м²/с; $D_3 = 10^{-5}$ м²/с ва $\omega_1 = 0,1$ м/(МПа·с); $\omega_2 = 0,1$ с⁻¹.

R^+ ва R^- соҳалар чегараси, яъни $y = 0$ дан ўтаётган модданинг нисбий сарфи Q , умумий ва жамланма нисбий сарфлари куйидагича

$$Q = D_3 \left| \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad Q_{\text{общ}} = \int_0^{\infty} Q dx, \quad Q_{\text{сум}} = \int_0^t Q_{\text{общ}} dt$$

ифодаланади.

Турли t вақтлардаги Q нинг профили колматациянинг кучайиши ва суффозиянинг кучсизланишида $y = 0$ чегарадан ўтувчи модданинг алоҳида олинган x нуқталарда масса алмашинувининг камайишини кўрсатади.

Таъкидлаймизки, R^+ соҳанинг $0 \leq y \leq h$, $x = 0$ бутун эни бўйича аралашма ҳайдалгандаги масалада кузатилган, тадқиқот вақти мобайнида Q нинг номонотон ўзгариши кузатилмади.

Суффозион омиллар кўчайиши ва кольматацион омиллар кучсизланишида $Q_{\text{оби}}$ ва $Q_{\text{сум}}$ ларнинг ошишини кузатиш мумкин.

(2), (3), (4), (6) тенгламалар полосасимон манба билан, яъни (1) қуйидаги

$$c = \begin{cases} 0, & \text{агар } x = 0, \quad 0 \leq y < \gamma_1 h, \quad \gamma_2 h < y \leq h, \\ c_0, & \text{агар } x = 0, \quad \gamma_1 h \leq y \leq \gamma_2 h, \quad c_0 = \text{const}, \quad \gamma_1, \gamma_2 \leq 1. \end{cases} \quad (7)$$

шарт билан алмаштирилди.

Нуктали манба билан солиштирганда, бу ерда c/c_0 профили R^+ да ҳам R^- да ҳам кенгироқ соҳани эгаллади. Кольматацион-суффозион ходисалар нуктали манба берилган ҳолдаги каби таъсир қилади. Кольматацион омиллар ҳисобидан R^+ да ғоваклик сезиларли камайиши содир бўлади. Бунда кольматацион омилларнинг сезиларли бўлиши ва суффозия омилининг кучсиз бўлиши ε нинг сезиларли камайишига олиб келади. Бироқ, ғоваклик ўзгариш соҳасининг ўлчамлари камаяди. Айтилганларни яна қуйидагича таҳлил қилиш мумкин: ғовак муҳитда модданинг диффузион кўчишига кольматацион омиллар қарши таъсир қилади, суффозион омиллар эса ижобий таъсир этади. Ғовакликнинг камайиши муҳит ўтказувчанлиги камайишига ва ўз навбатида муҳит филтратацион қаршилиги ўсишига олиб келади.

Чегаравий суффозион босим градиентини (ЧСБГ) ҳисобга олиб икки ўлчамли соҳада кольматацион-суффозион сизиш математик моделини қараймиз. ЧСБГ параметри биринчи бўлиб Б.Х.Хўжаёров ишларида киритилган. Баланс тенгламаси сифатида соддалик учун одатий модда баланс тенгламасидан фойдаланамиз.

Шундай қилиб, R^+ да кольматацион-суффозион сизиш тенгламалари (2) кўринишда, (3) ўрнига

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \begin{cases} \omega_1(\varepsilon_0 - \varepsilon)(|\nabla p| - |\nabla p_c|) - \omega_2 \varepsilon c, & \text{агар } |\nabla p| > |\nabla p_c|, \\ -\omega_2 \varepsilon c, & \text{агар } |\nabla p| \leq |\nabla p_c| \end{cases} \quad (8)$$

тенгламадан фойдаланамиз, бунда $|\nabla p_c|$ – ЧСБГ параметри модули.

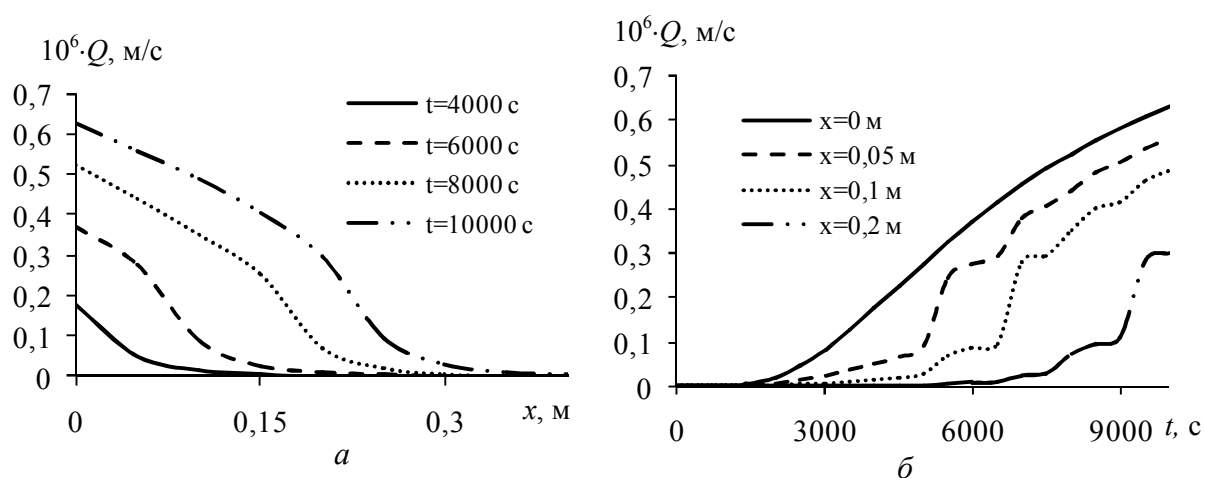
Масала шундай қўйилишда нуктали манба ҳоли учун ечилди. Олдин тасдиқланган бир ўлчамли масалалар ечимидаги кузатилган сезиларли ўзгаришлар ∇p_c нинг c/c_0 тарқалишига сезиларли таъсир этмайди.

$\nabla p_c = 0$ бўлгандагидан фарқли равишда бу ерда ε нинг ўзгариши турли темпли икки соҳага ажратишимиз мумкин. Биринчи соҳада ε нинг қийматлари кольматацион омиллар ҳисобидан сезиларли камаяди, иккинчи соҳада эса ε нинг сезиларсиз ўзгаришини кузатиш мумкин. Сиртда соҳалар умумий чегараси ε нинг қийматлари бирдан ўзгариши билан характерланади.

Q нинг ўзгариш характерида нисбий синишни аниқлаш мумкин, бу ҳолни $|\nabla p|$ $y = 0$ чегарада $|\nabla p_c|$ дан ўсиш фронтига эришишлиги билан изоҳланади

(2,а-расм). Кичик вақтларда $|\nabla p| > |\nabla p_c|$ фронт $y = 0$ чегарага етиб бормайди, Q нинг ўзгариш суръати нисбатан биржинсли бўлади. $|\nabla p| \leq |\nabla p_c|$ суффозия қатнашмаган соҳада (соф қолматацияли соҳа) Q нисбий масса алмашинуви $|\nabla p| > |\nabla p_c|$ соҳадагига нисбатан бирмунча кичик бўлади. Суффозия омилларининг камайиши ва қолматация омилларнинг ошишида $x > 0$ нуқталарда Q нинг қиймати камаяди.

R^+ ва R^- умумий чегарасида алоҳида олинган нуқталарда Q нинг ўсишини кузатиш мумкин. $x = 0, y = 0$ нуқтада Q нинг бир текис ўсиши кузатилади, $x > 0, y = 0$ ларда эса Q нинг пульсацион суръатда ўсиши олинди (2,б-расм). Бундай динамика R^+ нинг турли нуқталарида $|\nabla p|$ босим градиенти $|\nabla p_c|$ дан кичик бўлади ва бошқа режимга ўтишлиги билан изоҳланади.



2-расм. R^+ ва R^- соҳалар чегарасида нисбий модда оқими Q нинг турли вақтларда (а) ва Q нинг турли x ларда t бўйича (б) ўзгариши, бунда $D_1 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_2 = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_3 = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\omega_1 = 0,1 \text{ м}/(\text{МПа} \cdot \text{с})$; $\omega_2 = 0,1 \text{ с}^{-1}$.

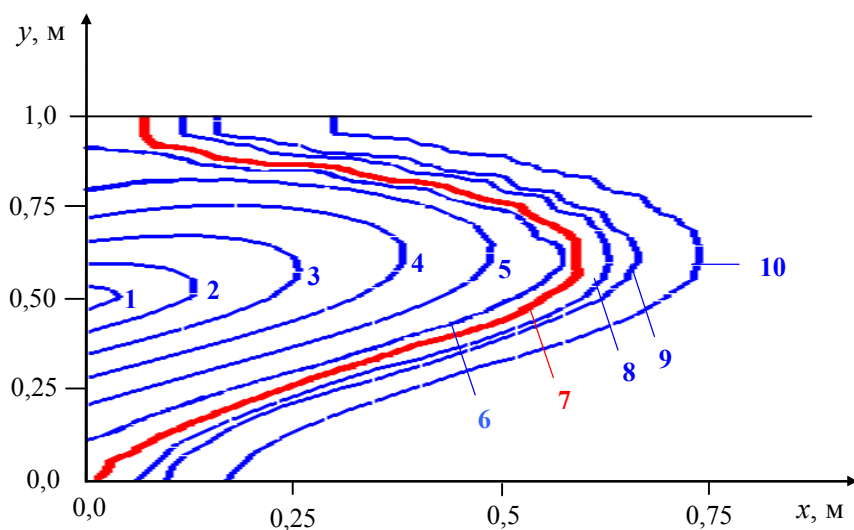
Q нинг пульсацион суръатда ўзгариши $Q_{\text{общ}}$ динамикасида ўз аксини топади, бироқ Q нинг пульсацион динамикаси $Q_{\text{сум}}$ жамланма нисбий сарфга кам таъсир этади, яъни Q нинг пульсацион суръатининг ошиши $Q_{\text{сум}}$ да интеграллаш ҳисобидан сезиларли даражада силиқланади.

3-расмда $|\nabla p|$ нинг сатҳ чизиқлари келтирилган. Бу чизиқлар $|\nabla p| > |\nabla p_c|$ режимнинг $|\nabla p| \leq |\nabla p_c|$ режимга ўзгариш фронтининг тарқалишини аниқ кўриш мумкин. Суффозион омилларнинг пасайиши ҳамда қолматацион омилларнинг кучайиши бу фронт тарқалишини секинлаштиради.

Сўнгра ЧСБГли икки ўлчамли сизиш масаласи полоса шаклидаги манба ҳолида ечилди.

Олдинги ҳоллардагидек ∇p_c нинг роли бу ерда алоҳида намоён бўлмади. Чегарадан нуқтали манба берилган ҳол билан таққосланганда бу ерда ғоваклик нисбатан катта соҳада камаяди, соҳанинг эни сезирали катта бўлади.

Сиртларда $|\nabla p| > |\nabla p_c|$ ва $|\nabla p| \leq |\nabla p_c|$ соҳаларга ажралувчи яққол чегарани кўрсатиш мумкин. Босим градиенти майдони R^+ да кенгроқ соҳани эгаллайди ва масалаларнинг бир хил параметрларида ∇p нинг қийматлари нуқтали манба бўлган ҳолга нисбатан мос нуқталардаги қиймати катта бўлади.



№ п/п	$ \nabla p $, МПа/м
1	1,035
2	0,994
3	0,914
4	0,878
5	0,819
6	0,774
7	0,75
8	0,623
9	0,57
10	0,549

3-расм. $|\nabla p|$ сатҳ чизиқлари, бунда $t = 5000$ с, $\omega_1 = 0,1$ м/(МПа·с); $\omega_2 = 0,1$ с⁻¹.

D_3 D_2 га нисбатан кичик бўлган ҳолда ҳам тадқиқот ўтказилган. $y = 0$ да c/c_0 концентрация сиртларида концентрация градиентининг узилишини кузатишимиз мумкин, яъни $\partial c/\partial y$ узилади. Ғоваклик ва босим градиенти майдонлари сезиларли ўзгармайди.

Алоҳида параграфда суюқлик ҳаракатда ва кам ҳаракатда бўлган ғоваклик муҳитда кольматацион-суффозион сизиш масаласи тадқиқ этилди.

R^+ соҳада суюқлик x ва y йўналишлар бўйича ҳаракатланади. R^- соҳада ҳам конвектив-диффузион, кольматацион-суффозион модда кўчиши содир бўлади. Бу соҳанинг ёмон ўтказувчанлигини ҳисобидан $v_{2x} < v_{1x}$, $v_{2y} < v_{1y}$, $D_{2x} < D_{1x}$, $D_{2y} < D_{1y}$ деб фараз қиламиз, бу ерда v_{ix} , v_{iy} ($i = 1, 2$) – R^+ ва R^- даги сизиш тезлиги компонентлари, D_{ix} , D_{iy} – R^+ ва R^- да бўйлама ва кўндаланг диффузия коэффицентлари (бунда ва кейинчалик $i = 1$ – R^+ га, $i = 2$ эса R^- га мос келади). Юқорида баён этилганларни ҳисобга олиб R^+ ва R^- да модда кўчиши жараёни қуйидаги тенгламалар билан ифодаланади

$$\varepsilon_{0i} \frac{\partial c_i}{\partial t} + v_{ix} \frac{\partial c_i}{\partial x} + v_{iy} \frac{\partial c_i}{\partial y} = \varepsilon_{0i} \left\{ D_{ix} \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + D_{iy} \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} \right\} + \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t}, \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} = \omega_1 (\varepsilon_{0i} - \varepsilon_i) |\nabla p_i| - \omega_2 \varepsilon_i c_i, \quad i = 1, 2, \quad (10)$$

бунда c_i – суюқликда каттик заррачаларнинг ҳажмий концентрацияси, ε_{0i} , ε_i – бошланғич ва жорий ғовакликлар, $|\nabla p_i|$ – p_i босимлар градиенти модуллари.

R^+ ва R^- да сизиш тезлиги компонентлари қуйидагича аниқланади

$$v_{ix} = -\frac{k_i(\varepsilon_i)}{\mu} \frac{\partial p_i}{\partial x}, \quad v_{iy} = -\frac{k_i(\varepsilon_i)}{\mu} \frac{\partial p_i}{\partial y}, \quad i=1, 2, \quad (11)$$

бунда μ – суюқлик қовушқоқлиги, $k_i(\varepsilon_i)$ – R^+ ва R^- соҳалар ўтказувчанлик коэффициентлари, кольматацион-суффозион омиллар ҳисобидан ε_i нинг функциялари ҳисобланади.

Туташлик

$$\frac{\partial(\rho v_{1x})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_{1y})}{\partial y} = -\frac{\partial(\rho \varepsilon_1)}{\partial t},$$

эластик ғовак муҳит ва эластик суюқлик ҳолатлари

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta_{\text{жс}}(p_1 - p_0)], \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_{01} + \beta_{c1}(p_1 - p_0)$$

тенгламаларидан фойдаланиб ушбу кўринишдаги пьезоўтказувчанлик тенгламасини ҳосил қиламиз

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = \chi_1 \left((\varepsilon_{01} + \beta_1^*(p_1 - p_0)) \left(\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_1}{\partial y^2} \right) + \beta_1^* \left(\left(\frac{\partial p_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p_1}{\partial y} \right)^2 \right) \right),$$

бунда ρ – суюқлик зичлиги, $\beta_{\text{жс}}$ – суюқликнинг ҳажмий сиқилиш коэффициенти, β_{c1} – R^+ соҳанинг эластиклик коэффициенти, ρ_0 – суюқликнинг бошланғич зичлиги, p_0 – дастлабки ҳолатдаги босим, $\chi_1 = \frac{k_{01}}{\mu \beta_1^*}$.

Эластиклик режими назариясидагидек, охириги тенгламадаги квадрат ҳадларни иккинчи тартиби кичиклигидан ташлаб юбориш мумкин, натижада

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = \chi_1^*(p_1) \left(\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_1}{\partial y^2} \right), \quad \chi_1^*(p_1) = \chi_1 (\varepsilon_{01} + \beta_1^*(p_1 - p_0)). \quad (12)$$

R^- соҳада босимни аниқлаш учун шунга ўхшаш пьезоўтказувчанлик тенгламаси олинади.

Ниҳоят, R^+ ва R^- соҳаларда (9) баланс тенгламалари, (10) кинетика тенгламалари, (11) Дарси қонунлари ва (12) пьезоўтказувчанлик тенгламаларидан ташкил топган модданинг кольматацион-суффозион кўчиши тенгламалар системасини ҳосил қиламиз.

Тенгламалар системаси чекли айирмалар усули билан ечилди. Сонли тажрибалар асосида иккала соҳада концентрация, босим градиенти, ғоваклик ва сизиш тезлиги майдонлари аниқланди. R^+ ва R^- соҳалардаги модда концентрацияси сиртларида ўсишни кузатиш мумкин, кичик x ларда модданинг R^- га ўтиши сезиларли бўлади.

Суффозия ва колматация омилларининг кучайтирилиши R^+ ва шунингдек R^- да модда концентрациясининг тарқалишига сезиларли таъсир кўрсатади. R^+ ва R^- соҳалар чегарасида босим градиентининг қиймати R^- соҳа ўтказувчанлигининг кичиклиги ҳисобидан ошиб боради. $(0,0)$ нуқтада босим градиенти вақт бўйича камаяди.

$y=0$ чегарадан ўтувчи модданинг нисбий сарфи Q қуйидагича аниқланади

$$Q = \left(v_{2y} c_2 + D_3 \left| \frac{\partial c_2}{\partial y} \right| \right) \Big|_{y=0}.$$

Модданинг нисбий умумий сарфи вақт бўйича номонотон ўсиши аниқланди. Бунда суффозия омиллариининг кучайиши билан $Q_{\text{общ}}$ жадалрок ўсиш суръатига эга бўлади, кольматация омиллариининг кучайиши эса $Q_{\text{общ}}$ нинг ўсиш суръатини кучсизлантиради. Худди шундай динамика $Q_{\text{сум}}$ учун ҳам кузатилади.

Диссертациянинг **“Ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқликли ғовак муҳитда умумлашган тенглама асосида суспензиялар сизиши масалаларини ечиш”** деб номланган учинчи бобида суспензиялар сизиши жараёни ғовакли ҳажмнинг тўйинганлиги Ю.М.Шехтман схематизацияси асосида ўрганилади. Олдинги тадқиқотлардан фарқли равишда бу ерда ўтириб қолган масса концентрацияларининг турли майдонлари киритилади. Масса баланси тенгламаси чўкманинг қаттиқ заррачалар билан тўйинганлиги кинетикасини ҳисобга олиб ҳаракатланаётган аралашмадаги модданинг қаттиқ зарралар концентрациясига нисбатан ёзилади. Ғовак муҳитга аралашма берилишининг: нуқтадан, муҳитнинг бутун кенглиги бўйича, полоса бўйича турли вариантлари қаралган.

Иккинчи бобдаги каби масаланинг тадқиқот соҳаси икки: $R^+ \{0 \leq x < \infty, 0 \leq y \leq h\}$ ва $R^- \{0 \leq x < \infty, -\infty < y \leq 0\}$ қисмдан иборат.

R^+ соҳада модданинг кольматацион-суффозион кўчиши жараёни

$$q(t) \frac{\partial \delta}{\partial x} = [m_0 \delta - m_0(1 - \varepsilon)] \frac{\partial \zeta}{\partial t} - m_0(1 - \zeta) \frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_1 \frac{\partial \delta}{\partial x} \right] + D_2 \frac{\partial^2 \delta}{\partial y^2}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\omega_0}{1 + \gamma |\nabla p|} \delta - \omega_1 |\nabla p| \zeta, \quad (14)$$

$$v_0 = K(m) (|\nabla p| - |\nabla p_0|), \quad K(m) = k_0 m = k_0 m_0 (1 - \zeta(1 - \varepsilon)), \quad (15)$$

тенгламалар билан ифодалаш мумкин, бу ерда ζ – чўкмада ўтириб қолган заррачалар билан тўйинганлик; δ – ҳаракатланаётган аралашмада модданинг муаллақ қаттиқ зарраларнинг ҳажмий концентрацияси; m_0, m – муҳитнинг бошланғич ва жорий ғоваклиги; ω_0, ω_1 – кольматация ва суффозия жадаллигини мос равишда характерловчи параметрлар; ∇p_0 – оқим бўйича чегаравий босим градиенти; $q(t)$ – ғовак муҳит қўндаланг кесими бирлик юзасидан ўтувчи қаттиқ ва суюқ фазаларнинг умумий миқдори; γ – кольматацияга ∇p нинг таъсири жадаллигини характерловчи параметр; v_0 – сизиш тезлиги, ўзгармас; ε – ўтириб қолган масса ғоваклиги; D_1 –

гидродинамик дисперсия коэффициентлари $D_1 = D_0 + \frac{\lambda v_0}{m}$, $D_0 = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$ – ёйилиш коэффициентлари, v_0/m – суюқлик ҳаракатининг физик тезлиги.

R^- да модда кўчиши жараёнини қандайдир эффектив диффузия коэффициент D_3 бўлган оддий диффузия тенгламаси билан ифодалаш мумкин

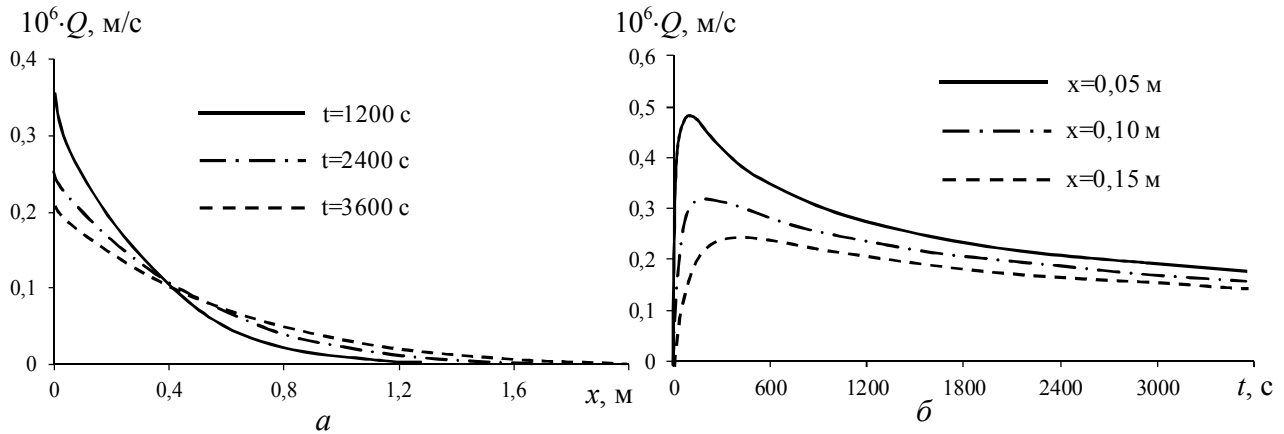
$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2 \delta}{\partial y^2}, (x, y) \in R^-. \quad (16)$$

R^+ соҳада $t > 0$ дан бошлаб $x = 0$, $0 \leq y \leq h$ чегарадан қаттиқ зарралар концентрацияси $\delta_0 = \text{const}$ бўлган суюқлик берилади.

(13) – (16) тенгламалар системаси чекли айирмалар усули билан ечилди. Ҳисоблаш натижалари кўрсатмоқдаги, R^+ да вақт ўтиши билан концентрациянинг ўсиш соҳаси ортиб боради. Суффозия омиллари кучайганда, қолматация омиллари камайганда δ/δ_0 нинг ҳаракатланаётган соҳаси кенгроқ бўлади. Бу ҳолат қолматация омилларининг камайишида қаттиқ заррачаларнинг катта қисми муаллақ ҳолатда бўлади ва бу зарралар конвекция ва гидродинамик дисперсия ҳисобидан суюқлик ҳаракати йўналиши бўйлаб кўчадилар. ζ нинг ўсиш соҳаси суюқлик ҳаракати йўналиши бўйлаб ҳаракатланиб, қолматация омилларининг ошиши нисбатан кўпроқ зарралар ўтиришига, суффозия омилларининг ошиши аксинча ζ майдон қийматлари камайишига олиб келади. $y = 0$ га яқин жойларда ζ сиртнинг кескин деформациясини кузатиш мумкин, бу R^+ дан R^- га масса кўчиши билан изоҳланади. Дастлаб кичик x ларда Q нинг қимати катта бўлиб, вақт ўтиши билан бу қийматлар босқичма-босқич камайиб боради, худди ўша вақтда x нисбатан каттароқ бўлганда Q нинг ўсиши давом этади, яъни Q нинг динамикасида номонотонлик кузатилади (4-расм). Q нинг динамикасидаги номонотонлик ходисалари $Q_{\text{общ}}$ ва $Q_{\text{сум}}$ ларнинг динамикаларида ўз аксини топмайди. $Q_{\text{общ}}$ нинг ўсиш суръати доимий камайиб боради, $Q_{\text{сум}}$ эса доимий ўсиш суръатида бўлишлиги кузатилади.

Сўнгра аралашма битта нуқтадан берилган режимда ва полоса орқали биржинслимас суюқлик берилганда муҳитда сизиш масалалари ечилган.

Суюқлик ҳаракати ва зарралар кўчишининг қуйидаги δ/δ_0 , ζ , $|\nabla p|$ лар ҳамда ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқлик соҳаларининг умумий чегарасидаги алоҳида нуқталардан ўтаётган Q нисбий масса алмашинув, $Q_{\text{общ}}$ умумий ва $Q_{\text{сум}}$ жамланма нисбий масса алмашинувлар характеристикалари баҳоланган. Натижалар кўрсатмоқдаки, R^+ да $x = 0$ чегара полосасидан қаттиқ заррачали суюқлик берилганда, нуқтали режим билан берилган ҳолга нисбатан кўчиш характеристикалари ошиб боради. Бироқ, бутун $x = 0$, $0 \leq y \leq h$ чегарадан берилган ҳолдагига нисбатан кўчиш характеристикалари секинлашади.



4-расм. R^+ ва R^- соҳалар чегарасида нисбий модда оқими Q нинг турли вақтларда (а) ва Q нинг турли x ларда t бўйича (б) ўзгариши, бунда $D_0 = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_2 = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_3 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\omega_0 = 0,05 \text{ с}^{-1}$, $\omega_1 = 0,05 \text{ м}/(\text{МПа} \cdot \text{с})$.

ЧСБГ параметри билан масала таҳлил қилинган. Масаланинг бундай қўйилишида тенгламалар системаси (13), (15), (16) ва чўкмадаги ўтириб қолган зарралар билан тўйинганлиги кинетика тенгламаси (14) нинг ўрнига

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \begin{cases} \frac{\omega_0}{1 + \gamma |\nabla p|} \delta - \omega_1 (|\nabla p| - |\nabla p_c|) \zeta & \text{агар } |\nabla p| > |\nabla p_c|, \\ \frac{\omega_0}{1 + \gamma |\nabla p|} \delta & \text{агар } |\nabla p| \leq |\nabla p_c|, \end{cases} \quad (17)$$

тенгламадан фойдаланилган, бунда $|\nabla p_c|$ – ЧСБГ параметри модули.

Бу ерда янги параметр сифатида $|\nabla p_c|$ дан фойдаланилди, асосий эътибор унинг таъсирига қаратилади. Натижалар кўрсатмоқдаки, δ/δ_0 майдонга $|\nabla p_c|$ нинг таъсири жуда сезиларли эмас, $|\nabla p_c|$ нинг δ/δ_0 га кучсиз таъсирини концентрация майдонинг диффузион ёйилиши билан изоҳланади. $|\nabla p_c| = 0$ бўлгандаги натижалардан фарқли равишда ζ нинг қийматлари кескин ошганлигини таъкидлаш мумкин. Агар $|\nabla p_c| = 0$ да ζ нинг максимал қиймати 0,0176 га тенг бўлган бўлса, ҳозирги ҳолатда 0,1513 га тенг бўлади. Ҳозирги ҳолда $|\nabla p_c|$ нинг таъсири яна руй беради ва суффозия содир бўлиши фронтида ζ нинг бирдан камайганлиги кўринади. $|\nabla p_c| \neq 0$ да ва қолган параметрлар қийматлари ўзгармаганда $|\nabla p|$ сезиларли ўсади. Тадқиқот натижалари кўрсатмоқдаки, $|\nabla p_c|$ ни ҳисобга олиш x бўйича Q нинг тарқалишини сезиларни қисқартирмоқда.

Суюқлик битта нуқтадан берилган масалада δ/δ_0 , ζ , $|\nabla p|$ майдонларининг тарқалиши секинлаши аниқланди. Мос равишда Q , $Q_{\text{общ}}$, $Q_{\text{сум}}$ ларнинг ҳам қийматлари пасайиши ва пульсацион ўзгариши секинлашади.

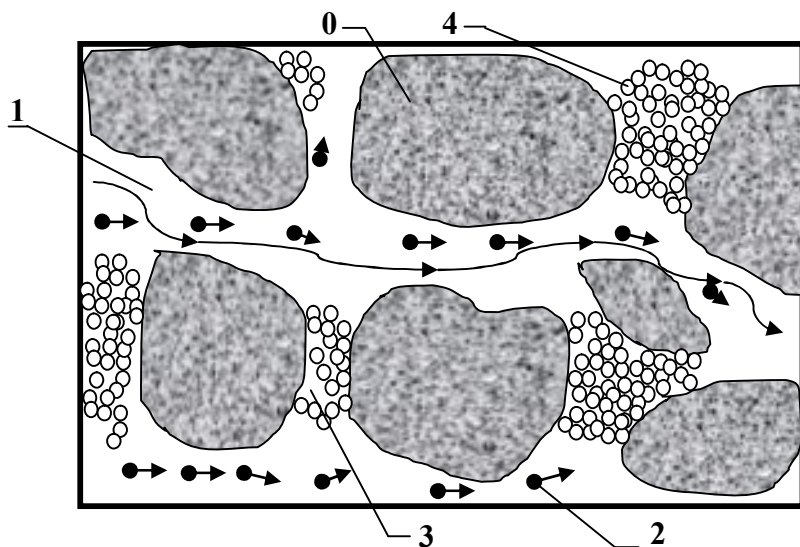
Диссертациянинг “Ғовак муҳитда чўкма ҳосил қилиб суспензиялар сизишининг математик моделларини тузиш ва таҳлил қилиш” деб номланган тўртинчи бобида ташувчи фаза сиқилувчанлигини ҳисобга олган ҳолда суспензия сизиши тенгламаси келтириб чиқарилган, консолидацияланувчи чўкма ҳосил бўлувчи суспензия сизиши модели тузилган. Кўп фазали континуумлар механикаси тамойилларидан фойдаланган ҳолда бир-биридан структураси ва хоссалари фарқ қилувчи икки хил турдаги чўкма ҳосил бўлиши ҳисобга олиниб, икки компоненти суспензия сизиши модели тузилган.

Қаралаётган муҳитнинг ғовак фазоси куйидаги ташкил этувчилар билан тўлдирилган: 1) ҳаракатланувчи суюқлик; 2) суюқлик оқими билан биргаликда ҳаракатланувчи аралашмадаги муаллақ заррачалар; 3) ўтириб қолган заррачалар билан боғланган ҳаракатланмайдиган суюқлик; 4) ғовак фазо орасида ўтириб қолган ҳаракатланмайдиган заррачалар.

Ғовак фазонинг сизувчи система қисмлари билан тўлдирилиш даражаси S_k ҳажмий қисмлар билан аниқланади

$$S_k = \frac{V_k}{V_{\text{пор}}} , \quad k = 1, 2, 3, 4, \quad (18)$$

бу ерда V_k - сизувчи система k -қисмининг ҳажми, $V_{\text{пор}}$ - элементар ғовак муҳитдаги ғовак ҳажми. k индекс қиймати система қисми тартиб рақамига мос келади (5-расм). Сизувчи муҳит ташкил этувчиларини шартли равишда фазалар деб атаيمиз.



5-расм. Муҳит ғовак фазосининг тўлдирилиши схемаси. 0 – ғовак муҳит скелети, 1 – ҳаракатланувчи суюқлик; 2 – суюқлик оқими билан биргаликда ҳаракатланувчи аралашмадаги муаллақ заррачалар; 3 – ўтириб қолган заррачалар билан боғланган ҳаракатланмайдиган суюқлик; 4 – ғовак фазо орасида ўтириб қолган ҳаракатланмайдиган заррачалар.

Суюқлик ва муаллақ заррачалар тезликлари тенг деб ҳисобланиб, бир тезликли модел қаралади. У ҳолда 1, 2 – фазалар тезликлари умумий тезлик орқали қуйидагича аниқланади

$$\vec{U}_k = \frac{S_k}{S_1 + S_2} \vec{U}, \quad k=1,2. \quad (19)$$

Сизиш тезлиги $\vec{U}$ ва босим градиенти p ўртасидаги боғлиқлик Дарси қонунидан аниқланади

$$\vec{U} = -\frac{k(S_3, S_4)}{\mu(c)} \nabla p, \quad (20)$$

бу ерда $k(S_3, S_4)$ – муҳитнинг ўтказувчанлиги, $\mu(c)$ – суспензия қовушқоқлиги, c – ҳаракатланувчи суюқликдаги муаллақ заррачалар концентрацияси, $c = \frac{S_2}{S_1 + S_2}$.

Қаралаётган тўрт фазали муҳит учун сизиш тенгламалар системасини ёзамиз. Масса сақланиш тенгламасини (узлуксизлик тенгламаси) фазалараро алмашилишларни ҳисобга олган ҳолда қуйидагича ифодалаш мумкин

$$\begin{aligned} m_0 \frac{\partial S_1}{\partial t} &= -\operatorname{div}((1-c)\vec{U}) - J_{1,3}, \\ m_0 \frac{\partial S_2}{\partial t} &= -\operatorname{div}(c\vec{U}) - J_{2,4} + J_{4,2}, \\ m_0 \frac{\partial S_3}{\partial t} &= J_{1,3}, \\ m_0 \frac{\partial S_4}{\partial t} &= J_{2,4} - J_{4,2}, \end{aligned} \quad (21)$$

бу ерда m_0 – чўкма ҳосил бўлмаган пайтда, жараён бошланишидаги муҳит ғоваклиги, $J_{1,3}$ – биринчи фазадан учинчи фазага ўтувчи суюқлик оқими зичлиги, $J_{2,4}$ – қолматация оқими тезлиги – муаллақ заррачаларнинг ҳаракатланувчи ҳолатдан (иккинчи фаза) ҳаракатланмайдиган ҳолатга (тўртинчи фаза) ўтиши, $J_{4,2}$ – суффозия оқими тезлиги, яъни муаллақ заррачаларнинг ҳаракатланмайдиган ҳолатдан (тўртинчи фаза) ҳаракатланувчи ҳолатга (иккинчи фаза) ўтиши.

p га нисбатан тенгламани ҳосил қилиш учун (21) нинг биринчи тенгламасини, Дарси қонунини (20), кам сиқилувчан суюқликлар учун ҳолат тенгламасини $\rho_f = \rho_0 [1 + \beta_f(p - p^0)]$ ($p^0 = 0$ билан) ва $J_{1,3} = \frac{\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} (J_{2,4} - J_{4,2})$ муносабатни ишлатиш мумкин, бу ерда $\beta_f = \text{const}$. Бир ўлчамли ҳолда қуйидаги тенгламага эга бўламиз

$$m_0 \frac{\partial [S_1(1 + \beta_f p)]}{\partial t} = \frac{k_0}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{(1 + \beta_f p) S_1 [1 - \sqrt{1 - (S_1 + S_2)}]^3}{S_1 + \frac{7}{2} S_2} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + Q, \quad (22)$$

бу ерда

$$Q = \frac{\varepsilon_0(1 + \beta_f p)}{1 - \varepsilon_0} \left\{ \beta_s S_4 - \alpha_s \frac{S_2}{S_1 + S_2} + \left(\beta_d S_4 - \alpha_d \frac{k_0}{\mu_0} S_2 \frac{[1 - \sqrt{1 - (S_1 + S_2)}]^3}{S_1 + \frac{7}{2} S_2} \right) \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right| \right\},$$

ε_0 – чўкма ғоваклиги, $\alpha_s, \alpha_d, \beta_s, \beta_d$ – ўзгармаслар.

(21) тенгламаларга куйидаги муносабатни ҳам қўшиш лозим

$$\sum_{k=1}^4 S_k = 1. \quad (23)$$

(21) (бир ўлчамли ҳолда), (22) тенгламалар системаси куйидаги бошланғич ва чегаравий шартларда чекли айирмалар усули билан ечилади

$$p(0, x) = 0, \quad p(t, 0) = p_0, \quad p(t, \infty) = 0, \quad p_0 = \text{const}. \quad (24)$$

$$S_1(0, x) = 1, \quad S_2(0, x) = S_3(0, x) = S_4(0, x) = 0, \quad \left. \frac{S_2}{S_1 + S_2} \right|_{x=0} = c_0 = \text{const}. \quad (25)$$

(22) дан босим майдонини аниқлаб, U ни Дарси қонунидан топамиз. Кейин (21) тенгламалар системасининг иккинчи, учинчи, тўртинчи тенгламаларни ечиб ва (23) дан фойдаланиб, $S_k, k = 1, 4$ ларни топамиз.

$\beta_f \neq 0$ бўлганда бошқа параметрларнинг турли қийматлари учун ҳисоблаш экспериментлари ўтказилди. Бу ҳолда тўйинганликлар ўзгаришининг умумий қонуниятлари ўзгармасдан қолади, лекин сизиш тезлиги x бўйича доимий бўлмайди.

М.Д.Носков ва бошқаларнинг ишида ғовак муҳитда чўкма ҳосил қилувчи заррачалар доимий структурага эга ва сизиш жараёнида ўзгармайди деб ҳисобланган. Лекин гидродинамик кучлар таъсирида чўкма ўз структурасини ўзгартиради, заррачаларнинг қайта жойлашиши содир бўлади ва унинг ғоваклиги камаяди. Бошқача айтганда, чўкма зичлашади ва консолидация юз беради.

Ғовак муҳитда тупик ва ўлик соҳаларни ҳисобга олмаганда чўкма, суспензиянинг ҳаракатдаги қисми босими ҳисобидан ҳар томондан сиқилади. Шунинг учун, ҳаракатдаги суспензия босими таъсирида чўкма консолидацияси содир бўлади деб фараз қиламиз. Копейкина А.А. ва бошқаларнинг ишига ўхшаш чўкма ғоваклигининг ўзгаришини куйидагича

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{1 + \varepsilon_\alpha p} \quad (26)$$

ифодалаймиз, бу ерда ε_α – ғовакликнинг бирлик сиқувчи кучланишга нисбатан нисбий ўзгаришини ифодаловчи коэффициент.

Чўкма консолидациясини ҳисобга олган ҳолда тўйинганликларга нисбатан тенгламалар ситемасини ёзамиз

$$\begin{aligned} m_0 \frac{\partial S_1}{\partial t} &= -\operatorname{div}((1-c)\vec{U}) - J_{1,3} + J_{3,1}, \\ m_0 \frac{\partial S_2}{\partial t} &= -\operatorname{div}(c\vec{U}) - J_{2,4} + J_{4,2}, \\ m_0 \frac{\partial S_3}{\partial t} &= J_{1,3} - J_{3,1}, \\ m_0 \frac{\partial S_4}{\partial t} &= J_{2,4} - J_{4,2}. \end{aligned} \quad (27)$$

Таъкидлаб ўтамикки, суёқликнинг чўкмадан ҳаракатланувчи суёқликка ўтиши учинчи фаза учун баланс тенгламасида ҳам ҳисобга олинган.

(27) даги $\vec{U}$ (20) Дарси қонунидан топилади.

(27) даги барча тенгламаларни йиғиб ва $\sum_{k=1}^4 S_k = 1$ ни ҳисобга олиб, қуйидагига эга бўламиз

$$\operatorname{div}\left(\frac{k(S_1, S_2)}{\mu(c)} \operatorname{grad} p\right) = 0. \quad (28)$$

$k(S_1, S_2)$ ва $\mu(c)$ муносабатларни ҳисобга олсак (28) қуйидаги кўринишга келади

$$\operatorname{div}(\Omega(S_1, S_2) \operatorname{grad} p) = 0, \quad (29)$$

бу ерда

$$\Omega(S_1, S_2) = \frac{S_1 + S_2}{S_1 + \frac{7}{2} S_2} \left[1 - \sqrt{1 - (S_1 + S_2)}\right]^3.$$

Говак муҳитда суёқлик ва заррачаларни кўчириш жараёнига чўкма консолидациясининг таъсирини баҳолаш мақсадида юқоридаги модел асосида ҳисоблаш экспериментлари ўтказилди.

Ҳисоблаш натижалари кўрсатдики, чўкма консолидациясини ҳисобга олганда ҳаракатланмайдиган суёқликнинг нисбий миқдори камайди. Чўкмадан ажралиб чиққан суёқлик биринчи фазага ўтади ва консолидация ҳисобга олмаган ҳолдагига таққослаганда тўйинганлик ортади. Заррачаларнинг ўтириш кинетикаси, иккинчи фазадан тўртинчи фазага ўтиш амалда ўзгармайди. Консолидация натижасида чўкманинг умумий ҳажми ҳам камаяди.

Ҳақиқий суспензиялар, одатда, кўп компонентали бўлади. Суспензия фракциялари, яъни элтувчи фазадаги муаллақ заррачалар геометрик (ярим дисперслилик), физико-кимёвий (зичлик, юзасининг гидрофиллик даражаси ва ҳ.к), электрокинематик ва бошқа жиҳатдан бир-биридан фарқ қилиши мумкин. Кўп компонентали суспензиянинг энг содда ҳоли бир-биридан концентрацияси, адгезион, кинетик хоссалари билан фарқланувчи икки дисперс фракциялардан тузилган бинар суспензиядир.

Тўйинганликлар ўзгаришини тавсифловчи нисбатан тенгламалар ситемаси қуйидаги кўринишда ёзилиши мумкин

$$\begin{aligned}
 m_0 \frac{\partial S_1}{\partial t} &= -\operatorname{div}((1-c)\vec{U}) - J_{1,31} - J_{1,32}, \\
 m_0 \frac{\partial S_{21}}{\partial t} &= -\operatorname{div}(c_1\vec{U}) - J_{21,41} + J_{41,21}, \\
 m_0 \frac{\partial S_{22}}{\partial t} &= -\operatorname{div}(c_2\vec{U}) - J_{22,42} + J_{42,22}, \\
 m_0 \frac{\partial S_{31}}{\partial t} &= J_{1,31}, \\
 m_0 \frac{\partial S_{32}}{\partial t} &= J_{1,32}, \\
 m_0 \frac{\partial S_{41}}{\partial t} &= J_{21,41} - J_{41,21}, \\
 m_0 \frac{\partial S_{42}}{\partial t} &= J_{22,42} - J_{42,22},
 \end{aligned} \tag{30}$$

бу ерда $J_{1,31}, J_{1,32}$ – ҳаракатланувчи фазадан мос равишда биринчи ва иккинчи турдаги чўкмаларга ўтувчи суюқлик оқими зичлиги; $J_{21,41}$ – ҳаракатланувчи суспензиядан биринчи турдаги заррачаларнинг биринчи турдаги чўкмага ўтиш оқими зичлиги; $J_{41,21}$ – биринчи турдаги чўкмадан ҳаракатланувчи суспензияга қўшилувчи заррачалар оқими зичлиги; $J_{22,42}$ – ҳаракатланувчи суспензиядан иккинчи турдаги заррачаларнинг иккинчи биринчи турдаги чўкмага ўтиш оқими зичлиги; $J_{42,22}$ – иккинчи турдаги чўкмадан ҳаракатланувчи суспензияга қўшилувчи заррачалар оқими зичлиги, c – ҳаракатланувчи суспензиядаги заррачаларнинг умумий ҳажмий концентрацияси, у биринчи c_1 ва c_2 иккинчи турдаги заррачалар концентрацияларидан ташкил топган, яъни $c = c_1 + c_2$.

Юқорида келтирилган масала қуйидаги кетма-кетликда ечилади. Дастлаб (29) (бир ўзчовли ҳолда) тенглама (24) шартларда ечилади ва босим тарқалиши аниқланади. Дарси қонунидан сизиш тезлиги аниқланади. Кейин тўйинганликларга нисбатан ёзилган (30) тенгламалар ситемаси бошланғич ва чегаравий шартлар асосида ечилади.

Натижалар шуни кўрсатадики, заррачаларнинг ўтириб қолиши ва аниқ структурага эга бўлган чўкма ҳосил бўлиши туфайли муҳитнинг сизиши қаршилиги ортади, бу эса ўз навбатида муҳит бўйлаб босимнинг нотекис тақсимланиши ва муҳит ўтказувчанлигининг камайишига олиб келади. Концентрацион профиллар суюқлик оқими йўналишида ҳаракатланади. Чўкманинг умумий ҳажми (икки турдаги чўкма йиғиндиси) ҳам, эгаллаган ҳудуди ҳам вақт ўтиши билан ортади. Биринчи турдаги заррачалар ўтириб қолиши жадаллашиши ҳисобидан уларнинг ҳаракатланувчи фазадаги

тўйинганлиги камаяди, бир вақтда иккинчи турдаги ҳаракатдаги заррачалар билан тўйинганлик динамикасида бундай ҳолат кузатилмайди.

Шундай қилиб, бинар суспензиялар сизишида чўкма ҳосил бўлиши кинетикасига боғлиқ равишда чўкмаларнинг ортиши суспензиядаги заррачалар турига мувофиқ, турли хилдаги заррачалар учун ҳар хил бўлиши мумкин. Чўкмаларнинг ҳажми ва структураси моделга кирувчи ғоваклик ва кинетик параметрлар орқали аниқланади.

ХУЛОСА

“Бир жинсли бўлмаган суюқликларнинг ғовак муҳитларда сизишининг математик моделларини такомиллаштириш ва тадқиқ этиш” мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Турли чегаравий концентрацион режимлар учун ЧСБГни ҳисобга олиб (ва ҳисобга олмасдан ҳам) ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқлик соҳаларидан ташкил топган икки ўлчовли соҳада кольматацион-суффозион сизиш масаласи қўйилди ва сонли ечилди. Нисбий концентрация c/c_0 , ғоваклик ε , босим градиенти ∇p , оқимнинг нисбий масса алмашинуви Q , умумий $Q_{\text{общ}}$ ва жамланма $Q_{\text{сум}}$ нисбий сарфлар аниқланди. Суффозион омилларнинг кучсизланиши ва кольматацион омилларнинг кучайиши R^+ да заррачаларнинг ўтириб қолиши жадаллаштиришга олиб келади, бунда c/c_0 ўсиш соҳаси камаяди, ε камаяди ва ∇p ўсади, R^+ ва R^- соҳалар умумий чегарасидан ўтаётган нисбий массаалмашинуви камаяди. Полосасимон чегаравий концентрацион режим нуқтали режимга нисбатан R^+ ва R^- ларда модданинг жадалроқ тарқалишига олиб келади: c/c_0 - $R^+ \cup R^-$ да кенгроқ соҳани эгаллайди, ε яққолроқ камаяди, ∇p эса сезиларли даражада ошади. Нуқтали концентрацион режими билан таққосланганда, бу ҳолда R^+ ва R^- ларнинг умумий чегарасидан ўтаётган модда кўчиши жадалроқ бўлади ҳамда бу $Q_{\text{общ}}$, $Q_{\text{сум}}$ лар динамикасида ҳам ўз тасдиғини топди.

2. ЧСБГни ҳисобга олиш сизиш соҳасини икки қисмга ажратишига олиб келади: а) $|\nabla p| \leq |\nabla p_c|$; б) $|\nabla p| > |\nabla p_c|$ ва бу қисмларда сизиш характеристикаси динамикалари жиддий равишда бир-биридан фарқ қилиши мумкин. ∇p_c нинг концентарция майдонига таъсири камороқ бўлади, буни диффузион омиллар таъсири ҳисобидан изоҳлаш мумкин, яъни концентрацион майдонга тебранишини пасайтирувчи сифатида таъсир этади. ЧСБГ ҳисобидан Q ва $Q_{\text{общ}}$ ўсиш темпида пульсацион ўзгариш содир бўлади, бироқ бундай ўзгариш $Q_{\text{сум}}$ да деярли кузатилмади.

3. Ҳаракатдаги ва кам ҳаракатдаги суюқлик соҳаларидан ташкил топган ғовак муҳитда кольматацион-суффозион сизиш математик модели

такомиллаштирилди. Ҳаракатдаги ва кам ҳаракатдаги соҳаларнинг умумий чегарасида модданинг конвектив-диффузион кўчиши содир бўлиб, ҳаракатдаги суюқлик соҳасида модда концентрацияси, муҳит ғоваклиги, босим градиенти профилларига кучли таъсир ўтказишлиги намоён бўлди.

4. Икки соҳали ғовак муҳитда Ю.М.Шехтманнинг баланс тенгламасидан, динамик омилларни ва ЧСБГини ҳисобга олувчи кинетика тенгламасидан, умумлашган Дарси қонунидан ташкил топган қолъматацион-суффозион сизиш тенгламалар системаси тузилди. Тенгламалар системаси сонли тадқиқ этилиб, суюқликда каттиқ заррачалар концентрацияси δ/δ_0 , ғовак муҳитнинг ўтириб қолган заррачалар билан тўйинганлиги, жорий босим градиенти сиртлари, ҳаракатдаги ва ҳаракатсиз суюқлик соҳаларининг умумий чегарасидан ўтаётган каттиқ заррачаларнинг жорий, умумий, жамланма нисбий сарфлари аниқланди.

5. Ҳаракатсиз суюқлик чўкмасидан боғлиқ бўлган суспензия ташувчи фазаси сиқилувчанлигини ҳисобга олиб суспензия сизиши моделлари ишлаб чиқилган. Ҳисоблаш тажрибалари кўрсатадики, сиқилувчанлик сизиш тезлигининг қатлам бўйлаб биржинслимас тақсимланишига олиб келади, бироқ бу муҳитнинг бошқа фазалари билан тўйинганлигига кучсиз таъсир қилиши аниқланди.

6. Консолидацияланувчи чўкма ҳосил қилиб суспензия сизиши математик модели ишлаб чиқилди. Бу модел билан ўтказилган ҳисоблаш тажрибалари шуни кўрсатадики, чўкмадаги ҳаракатсиз суюқликнинг маълум бир қисми ҳаракатдаги ҳолатга ўтади, яъни учинчи фазадан биринчи фазага масса кўчиши содир бўлади. Таъкидлаб ўтилган ходисалар оқибатида чўкма консолидацияси чўкма ҳажмининг умумий камайишига олиб келади.

7. Ғовак муҳитда турли тузилишли чўкма ҳосил қилиб икки компонентали суспензия сизиши математик модели ва масалани сонли ечиш методикаси ишлаб чиқилди. Сонли тажрибалар асосида фазалар орасидаги масса алмашинуви жараёнига, муҳитнинг фазалар тўйинганлиги тарқалишига ва бошқа гидродинамик характеристикаларига кинетика коэффициентлари таъсири тадқиқ қилинди. Чўкма ҳосил бўлиши кинетикасидан боғлиқ равишда суспензияда турли типли заррачаларга мос келувчи турли кўринишдаги чўкмалар ўсишига олиб келишлиги аниқланди. Чўкмалар тузилиши ва ҳажмларини моделга киритилган ғоваклик ва кинетика параметрлари билан аниқланади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.08.2018.FM/T.02.09
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАХМУДОВ ЖАМОЛ МАХМУД УГЛИ

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ НЕОДНОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В
ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

01.02.05 – Механика жидкости и газа

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА НАУК (DSc) ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Самарканд – 2019

Тема диссертации доктора наук (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2017.3.DSc/FM94.

Докторская диссертация выполнена в Самаркандском государственном университете.

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

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

Официальные оппоненты: **Нормуродов Чори Бегалиевич**
доктор физико-математических наук

Равшанов Нормаммад
доктор технических наук, профессор

Хужаев Исмагулла Кушаевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства**

Защита диссертации состоится «24» мая 2019 года в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.30.08.2018.FM/T.02.09 при Самаркандском государственном университете (Адрес: 140104, г.Самарканд, Университетский бульвар, 15. Тел.: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, факс: (+99866) 239-11-40, e-mail: devonxona@samdu.uz)

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

Аннотация диссертации разослана «4» мая 2019 года. (реестр протокола рассылки № 5 от «3» мая 2019 года)



Р.И.Халмуродов
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 наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире уделяется большое внимание проблемам фильтрации дисперсных систем в пористых средах, непосредственно связанных с нефтегазовой промышленностью, химическими технологиями, экологией и др. В связи с этим опыт США, Австралии, Российской Федерации и других развитых государств в этих направлениях показывает, что в современных технологиях эксплуатации нефтяных месторождений вторичными и третичными методами широко используются математические модели фильтрации неоднородных жидкостей в продуктивных пластах с неоднородными сложными структурами. Математические модели фильтрации неоднородной жидкости и переноса вещества в макроскопически неоднородных пористых средах и методы их численного исследования служат теоретической основой для описания процессов очистки питьевых и сточных вод, повышения эффективности нефте-газо добычи, проектирования и управления сложными технологическими, тепло- и массообменными процессами.

В мире проводятся научно-исследовательские работы, направленные на анализ процесса фильтрации неоднородной жидкости в макроскопически неоднородной пористой среде, взаимодействия твердых взвешенных частиц с поверхностью скелета пористой среды, влияния осадкообразования на процессы фильтрации. В этом направлении, в том числе усовершенствование математических моделей фильтрации жидкости и газа в пористых средах и методов их исследования являются важными задачами. Вместе с этим необходимо разработать усовершенствованные математические модели, эффективные численные алгоритмы и программ для решения задач фильтрации неоднородных жидкостей и переноса веществ в макроскопически неоднородных пористых средах.

В нашей стране усиленное внимание уделяется к разработке математических и численных моделей, имеющих прикладное применение, алгоритмов численного решения сложных гидродинамических процессов, связанных с фильтрацией неоднородных жидкостей и переноса вещества в пористых средах, а также мероприятий по их внедрению в практику. В стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годах поставлены задачи, в том числе «...техническое и технологическое обновление производства, ...дальнейшая модернизация и диверсификация промышленности путем перевода ее на качественно новый уровень, направленные на опережающее развитие высокотехнологичных обрабатывающих отраслей, прежде всего по производству готовой продукции с высокой добавленной стоимостью на базе глубокой переработки местных сырьевых ресурсов;... последовательное внедрение современных экономических и эффективных технологий;... »³. Выполнение этих заданий, в том числе совершенствование математических

³ Указ Президента Республики Узбекистан «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» №УП-4947 от 7 февраля 2017 г.

моделей процессов очистки питьевых и сточных вод, воздействия на нефтегазовые пласты вторичными и третичными методами и создание эффективных алгоритмов и программных обеспечений, позволяющих проведение вычислительных экспериментов, считаются одним из важнейших задач.

Данное диссертационное исследование, в значительной степени, служит реализации задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии дальнейшего развития Республики Узбекистан», Постановлениях Президента Республики Узбекистан ПП-2954 от 4 мая 2017 года «О мерах по упорядочению контроля и учета рационального использования запасов подземных вод на 2017-2021 годы», ПП-3107 от 30 июня 2017 года «О мерах по совершенствованию системы управления нефтегазовым сектором» и ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», а также в других нормативно-правовых актах, связанных с данной деятельностью.

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».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации⁴. Научными исследованиями, направленными на разработку математических моделей, эффективных численных методов для решения задач фильтрации неоднородных жидкостей в макроскопически неоднородных пористых средах, занимаются в ведущих научных центрах мира и высших образовательных учреждениях, в том числе в Louisiana State University, Massachusetts Institute of Technology, University of Southern California (США), Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Уральском федеральном университете, Казанском федеральном университете, Российском Государственном университете нефти и газа имени И.М.Губкина, Уфимском государственном нефтяном техническом университете (Российская Федерация), Australian School of Petroleum (Австралия), Israel Institute of Technology (Израиль), Казахском национальном университете (Казахстан), Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз, Ташкентском государственном техническом университете, Самаркандском государственном университете (Узбекистан).

⁴ В обзоре международных научных исследований по теме диссертации использовались www.mathnet.ru; <http://www.mit.edu/>; <https://www.usc.edu/>; <https://ecms.adelaide.edu.au/petroleum-engineering/>; <https://www.technion.ac.il/en/technion-israel-institute-of-technology/>; <http://www.ou.edu/>; <https://www.syracuse.edu/>; <https://www.lsu.edu/>; <https://link.springer.com/search?query=porous+media>; www.dissercat.com/catalog/fiziko-matematiches-kie-nauki, <https://www.researchgate.net/publication>; Mechanistic Model for Nanoparticle Retention in Porous Media // Transport in Porous Media. November 2016, Volume 115, Issue 2, pp 387–406, <https://scholar.google.com/>; Mathematical modelling of fines migration in geothermal reservoirs // Geothermics, 2016 No. 59, pp. 123–133, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894710006443>; Deep-bed filtration model with multistage deposition kinetics // Chemical Engineering Journal. 2010. No. 163, pp. 78-85 и другие источники.

В результате проведенных в мире исследований по математическому моделированию процессов фильтрации неоднородных жидкостей и переноса вещества, в частности, влияние твердых частиц в суспензии на фильтрационно-емкостные свойства пористой среды, разработка адекватных математических моделей, эффективных вычислительных алгоритмов и программ для решения задач фильтрации и переноса были получены следующие результаты: разработаны математические модели процессов загрязнения подземных резервуаров (The University of Oklahoma, США), разработаны математические модели фильтрации суспензии в разных фильтрационных средах (Syracuse University, США), разработаны математическая модель и программное обеспечение процесса фильтрационной очистки загрязненной воды (Северный технологический институт, Россия), разработаны математические модели процессов фильтрации коллоидных, двухфазных и двухкомпонентных суспензий в пористых и трещиновато-пористых средах, очистки и обработки воды, промышленной фильтрации (Australian School of Petroleum, Австралия), созданы математические и численные модели процессов движения подземных вод и переноса загрязняющих веществ (Israel Institute of Technology, Израиль), разработаны математические модели и эффективные алгоритмы численного решения процессов переноса веществ и фильтрации одно- и многокомпонентных жидкостей в пористых средах (Самаркандский государственный университет, Ташкентский университет информационных технологий, Узбекистан).

В мире ведутся исследования по приоритетным направлениям, связанным с разработкой теории и математическим моделированием, описывающим фильтрацию неоднородных жидкостей и переноса веществ в пористых средах: разработка математических моделей процессов фильтрации многофазных, многокомпонентных жидкостей в пористых и трещиновато-пористых средах; математическое и численное моделирование процессов аномального переноса веществ и фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах, с помощью дифференциальных уравнений с частными производными дробного порядка; разработка математических моделей процессов фильтрации суспензий и переноса веществ в пористой среде с фрактальной структурой.

Степень изученности проблемы. В последнее время вопросы математического моделирования процессов переноса веществ и фильтрации неоднородных жидкостей развиваются интенсивно в основном за рубежом. В работе Ю.М.Шехтмана впервые систематизировано и детально обсуждены вопросы математического моделирования процесса фильтрации малоконцентрированных суспензий. За последние годы разработка и усовершенствование математических моделей процессов переноса вещества и фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах рассмотрены в работах таких ученых, как K.H.Coats, B.D.Smith, M.Th.van Genuchten, P.S.C.Rao, H.M.Selim, C.Tien, K.Ives, M.Sharma, M.Elimelech, J.Bear, F.Civan, A.Zamani, P.Bedrikovetsky, J.Herzig, Г.Баренблат, А.Х.Мирзаджанзаде, Е.В.Венецианов, К.С.Басниев, Р.И.Нигматулин, М.Д.Носков и др.

В Узбекистане в разработку математических моделей и вычислительных методов для исследования процессов фильтрации жидкости и газа в пористых средах внесли огромный вклад такие отечественные ученые, как Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Ж.Ф.Файзуллаев, Н.М.Мухидинов, Р.Садуллаев, И.Алимов, Ж.Акилов, Б.Х.Хужаёров, Ч.Б.Нормуродов, И.К.Хужаев, Н.Равшанов, Ш.Каюмов, В.Ф.Бурнашев и др.

Необходимо отметить, что существует ряд моделей фильтрации неоднородных жидкостей, в частности суспензий, описывающих основные особенности процесса. Феноменологические модели являются наиболее распространенными среди остальных моделей. Тем не менее, проблемы разработки адекватных феноменологических математических моделей, позволяющих исследовать и прогнозировать сложные реальные технологические процессы и фильтрации суспензии в макроскопически неоднородных средах изучены недостаточно полно. Однако в большинстве научных исследованиях не учтены влияния динамических факторов на фильтрацию суспензии в макроскопически неоднородных пористых средах, зон с неподвижной жидкостью на фильтрационные показатели зоны с подвижной жидкостью. В том числе, недостаточно полно проводились исследования, связанные с кольтматационно-суффозионной фильтрацией суспензии в пористой среде с подвижной и неподвижной жидкостью. Кроме этого, не разработаны математические модели фильтрации суспензии с образованием осадка с учетом его консолидации, двухчастичности суспензии и недостаточно полно изучено влияние сжимаемости несущей фазы на насыщенности остальных фаз среды.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего учебного заведения, в которой выполняется 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» (2008-2011) и №Ф4-Ф078 «Гидродинамические задачи фильтрования и фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах» (2012-2016).

Целью исследования является разработка усовершенствованных математических моделей фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах с учетом макроскопической неоднородности среды, фильтрации дисперсных жидкостей с неоднородным распределением поля скоростей фильтрации, фильтрации суспензий с учетом сжимаемости несущей фазы и консолидации осадка, фильтрации многокомпонентных суспензий с образованием осадков различной структуры.

Задачи исследования:

разработка и численное исследование математической модели фильтрации дисперсной жидкости и переноса вещества в двумерной области с под-

вижной и неподвижной (или малоподвижной) жидкостью, с учетом (и без учета) предельного суффозионного градиента давления;

усовершенствование и численное исследование математической модели кольматационно-суффозионной фильтрации суспензии в двухзонной пористой среде на основе обобщенного уравнения Ю.М.Шехтмана;

разработка и численное исследование математической модели фильтрации слабосжимаемой суспензии с образованием осадка внутри фильтра;

разработка и численное исследование математической модели фильтрации с образованием консолидирующегося осадка;

разработка и численное исследование математических моделей движения двухкомпонентной суспензии в пористой среде с образованием двух типов осадка, отличающихся по своим структурам и свойствам.

Объект исследования: пористые среды, через которые фильтруются неоднородные жидкости, в частности, суспензии.

Предмет исследования: математические модели, вычислительные алгоритмы и гидродинамический анализ процессов фильтрации суспензии и переноса вещества в пористой среде.

Методы исследования: В исследовании использованы методы механики многофазных сред и физико-химической гидродинамики, основные уравнения теории фильтрации в пористых средах, методы математического и численного моделирования.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

усовершенствована математическая модель кольматационно-суффозионной фильтрации неоднородной жидкости в двумерной пористой среде, состоящей из зон с подвижной и неподвижной (или малоподвижной) жидкостью, с учетом (и без учета) предельного суффозионного градиента давления;

усовершенствована математическая модель кольматационно-суффозионной фильтрации дисперсной жидкости в пористой среде с зонами подвижной и неподвижной жидкости на основе обобщенного уравнения Ю.М.Шехтмана;

разработана математическая модель фильтрации суспензии в пористой среде с учетом сжимаемости несущей фазы суспензии и связанной с осадком неподвижной жидкости;

разработана математическая модель фильтрации суспензии с образованием консолидирующегося осадка и установлено существенное влияние консолидации на фильтрационные показатели среды;

разработаны математические модели фильтрации двухкомпонентной суспензии в пористой среде с образованием осадков различной структуры на основе принципов механики многофазных систем.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

усовершенствованы математические модели и разработаны вычислительные алгоритмы для процессов фильтрации суспензии и переноса вещества в двухзонных пористых средах с зонами с подвижной и неподвижной жидкостью;

составлен эффективный алгоритм численного решения задачи фильтрации суспензии в пористой среды с учетом сжимаемости жидкости;

разработан эффективный алгоритм численного решения задачи фильтрации суспензии в пористой среды с учетом консолидации осадка;

разработано программное средство, предназначенное для решения задачи фильтрации двухкомпонентной суспензии в пористой среде с образованием осадков различной структуры.

Достоверность результатов исследования. При составлении уравнений фильтрации суспензии и переноса вещества использованы фундаментальные принципы механики сплошных сред – законы баланса массы, закон Дарси. При обосновании кинетических уравнений изменения структуры порового пространства за счет явлений коагуляции и суффозии использован феноменологический подход с тщательным обоснованием каждого допущения. При разработке модели фильтрации суспензии с образованием двух видов осадков использованы принципы механики многофазных систем. При численном решении задач проверена их устойчивость. На основе численных результатов проведен физический анализ и оценка их соответствия реальным гидродинамическим процессам.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в разработке теоретических основ и математических моделей, вносящих вклад в развитие теории фильтрации суспензий в пористой среде учитывая различные динамические факторы, образование осадков различной структуры при фильтрации многокомпонентной суспензии, а также разработка эффективных алгоритмов численного решения задач фильтрации.

Практическая значимость результатов исследования 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 и третичными методами, в частности, при моделировании процессов отложения нерастворенных частиц в поры пласта при кислотном воздействии, гидрологии и многих технологических процессов, где происходит фильтрация суспензии и перенос вещества в однородных и макроскопически неоднородных пористых средах.

Внедрение результатов исследования. На основе усовершенствованных математических моделей, эффективных вычислительных алгоритмов для численного анализа фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах:

усовершенствованные математические модели фильтрации суспензии в двухзонной пористой среде с подвижной и неподвижной жидкостью использованы в исследованиях фундаментального гранта под номером БВ-М-Ф4-001 «Математические модели и эффективные распределенные вычислительные алгоритмы для решения многомерных задач сложного тепло-массообмена» при усовершенствовании моделей сложных многомерных задач тепло- и массообмена (Министерство по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан, справка №33-8/238 от 15

января 2019 года). В результате, достигнуто усовершенствование математических моделей сложных многомерных задач тепло– и массообмена.

разработанные вычислительные алгоритмы решения задач фильтрации суспензии с учетом консолидации осадка и фильтрации двухкомпонентной суспензии использованы в исследованиях фундаментального гранта под номером БВ-М-Ф4-001 «Математические модели и эффективные распределенные вычислительные алгоритмы для решения многомерных задач сложного тепломассообмена» при разработке алгоритмических методов решения сложных многомерных задач тепло– и массообмена (Министерство по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан, справка №33-8/238 от 15 января 2019 года). В результате, вычислительные алгоритмы позволили существенно сократить время расчетов при решении задач сложного массопереноса в пористых средах;

усовершенствованные математические модели и численные алгоритмы фильтрации неоднородных жидкостей в пористой среде были использованы на объектах АО “Узнефтегаздобыча” для условий месторождений Северный Уртабулак (скважина №3), Южный Кемачи (скважина №118), Шуртепа (скважина №102) и Сарикум (скважина №22) (АО “Узбекнефтегаз”, справка №02/14-2-477 от 18 апреля 2018 года) при вычислении фильтрационно-емкостных свойств пласта с использованием вторичных и третичных методов воздействия. В результате, это дало возможность разрабатывать оптимальные планы геолого-технических мероприятий по кислотному воздействию на скважины, с учетом процессов отложения нерастворимых частиц в поры пласта;

усовершенствованные математические модели фильтрации суспензии и переноса вещества в пористой среде были использованы в следующих международных научных журналах: (Journal of Hydrology, Т.468-469 (2012) IF=1.832) при выводе математических моделей процессов инфильтрации и адсорбции, (Journal of Porous Media, 4 (2014), IF=0.504) при определении распределения температуры в пористых средах, насыщенных водой, (Journal of Porous Media, 5 (2014), IF=0.504) при определении зависимости коэффициента фильтрации от концентрации суспензии и скорости фильтрации. Использование научных результатов позволило вывести уравнения инфильтрации и адсорбции, определить поля распределения температуры и фильтрационных показателей среды.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 3 международных и 18 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 35 научных работ. Из них 1 монография, 12 научных статей, 3 - в зарубежных, 9 - в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Объём и структура диссертации. Диссертация, объём которой составляет 183 страниц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, приведен обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации, показано соответствии исследования приоритетному направлению развития науки и технологий республики, сформулированы цель и задачи, указаны объект и предмет исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений в практику результатов исследования, сведения об опубликованных работах по теме диссертации и структура диссертационной работы.

В первой главе диссертации **«Колматационно-суффозионная фильтрация в пористой среде с подвижной и неподвижной жидкостью»** приводится краткий обзор подходов, использованных при моделировании движения неоднородных жидкостей в пористых средах. Определены наиболее общие характерные особенности использованных до сих пор подходов. В частности, установлено, что феноменологические подходы моделирования основаны на использование уравнений баланса вещества, кинетики процессов осаждения частиц (изменения характера заполнения порового объема частицами, сорбции, десорбции и др.), а также обобщенного закона Дарси. Аналогичный подход использован в процессе моделирования колматационно-суффозионной фильтрации суспензии в макроскопически неоднородных пористых средах.

Во второй главе диссертации **«Решение двумерных задач фильтрации суспензии и переноса вещества в пористой среде с подвижной и неподвижной жидкостью»** исследуются задачи фильтрации суспензии и переноса вещества в двумерной пористой среде, состоящей из двух зон с различными фильтрационно-емкостными свойствами. Рассмотрены различные случаи задания режима подачи жидкости и вещества в среду. Поставлены и решены задачи также с учетом нового параметра – предельного суффозионного градиента давления.

Рассматривается задача фильтрации жидкости и переноса вещества в двумерной области в случае точечного источника. Область исследования задачи состоит из областей $R^+ \{0 \leq x < \infty, 0 \leq y \leq h\}$ и $R^- \{0 \leq x < \infty, -\infty < y \leq 0\}$. R^+ представляет собой область с подвижной жидкостью, а R^- – с неподвижной. Начиная с $t > 0$ в центре левой границы R^+ , т.е. $x = 0$, $y = h/2$ подается жидкость, содержащая твердые взвешенные частицы с концентрацией c_0 , т.е.

$$c = \begin{cases} c_0 & \text{при } x = 0, \quad y = h/2, \\ 0 & \text{при } x = 0, \quad y \neq h/2. \end{cases} \quad (1)$$

Движение жидкости в R^+ происходит с постоянной скоростью u . Таким образом, в R^+ осуществляется конвективный перенос твердого вещества, сопровождающийся продольной и поперечной диффузией.

Система уравнений кольтматационно-суффозионной фильтрации в области R^+ имеет вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D_1 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \omega_1 (\varepsilon_0 - \varepsilon) |\nabla p| - \omega_2 \varepsilon c, \quad (3)$$

где c – концентрация вещества, D_1, D_2 – коэффициенты продольной и поперечной диффузии, $\varepsilon_0, \varepsilon$ – первоначальная и текущая пористости, ω_1, ω_2 – коэффициенты, характеризующие интенсивность суффозии и кольтматации пор, $|\nabla p|$ – модуль градиента давления, t – время.

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

Процесс переноса вещества в R^- описывается уравнением

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}, \quad (x, y) \in R^-, \quad (4)$$

где D_3 – эффективный коэффициент диффузии.

В R^+ процесс движения смеси подчиняется обобщенному закону Дарси

$$\vec{w} = -K(\varepsilon) \nabla p, \quad (5)$$

где $\vec{w}$ – скорость фильтрации, p – давление, $K(\varepsilon)$ – коэффициент фильтрации.

Учитывая известную зависимость $w = u \cdot \varepsilon$ и закон Кармана-Козени

$$K(\varepsilon) = \frac{k_0 \varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}, \quad k_0 = \text{const}, \quad \text{определяем соотношение для градиента давления,}$$

т.е. из (5) получаем

$$|\nabla p| = \frac{u(1 - \varepsilon)^2}{k_0 \varepsilon^2}. \quad (6)$$

В R^+ при $x \rightarrow \infty$, и в R^- при $y \rightarrow -\infty$ считаем, что потоки вещества отсутствуют. Эти условия соответствуют закрытым бесконечным границам или этапу исследования задачи, когда концентрационные профили не достигают $x = \infty$ в R^+ и $y = -\infty$ в R^- .

Для решения системы уравнений (2) – (4), (6) с начальными и граничными условиями выключая (1) используется метод конечных разностей.

Вычислительные эксперименты проводились при следующих значениях параметров: $u = 6 \cdot 10^{-4}$ м/с, $k_0 = 10^{-2}$ м/(МПа·с), $\mu = 10^{-9}$ МПа·с, $h = 1$ м, $c_0 = 0,01$ и различные значения D_1 , D_2 , D_3 , ω_1 , ω_2 .

Результаты расчетов показывают, что кольтационно-суффозионные эффекты оказывают значительное влияние на распределение концентрационного поля. С уменьшением суффозионных эффектов и с увеличением кольтационных эффектов можно наблюдать отставание распространения концентрационных пространственных профилей.

В области же R^+ работает уравнение (1), где наряду с конвекцией и диффузией (как продольной, так и поперечной) кольтационно-суффозионные эффекты выступают в роли источника (стока) концентрации. Поэтому при $y = h$ можно наблюдать немонотонное изменение и оно менее ярко выражено при ослаблении суффозии и усилении кольтации (Рис.1,а). За счет кольтационно-суффозионных эффектов в R^+ образуется поле уменьшения пористости ε от первоначального значения ε_0 (Рис.1,б). Ослабление суффозионных и усиление кольтационных эффектов приводит к более значительному уменьшению ε . Уменьшение ε в соответствии с законом Кармана-Козени приводит к уменьшению проницаемости пласта, соответственно и коэффициента фильтрации.

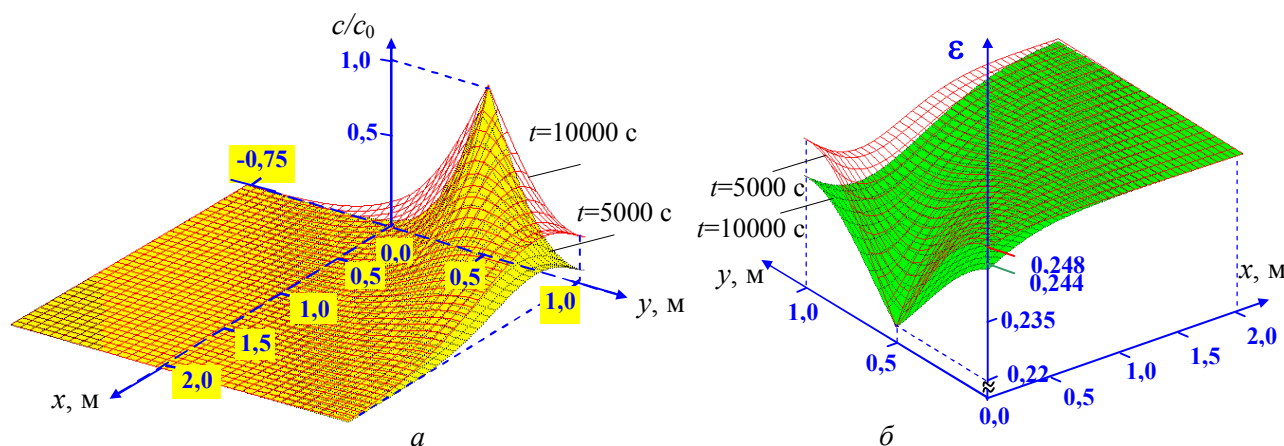


Рис. 1. Поверхности относительной концентрации c/c_0 (а) и пористости (б) при $D_1 = 5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $D_2 = 10^{-5}$ м²/с; $D_3 = 10^{-5}$ м²/с и $\omega_1 = 0,1$ м/(МПа·с); $\omega_2 = 0,1$ с⁻¹.

Относительный расход вещества Q , общий и суммарный относительные расходы через границу областей R^+ и R^- , т.е. $y = 0$ выражаются как

$$Q = D_3 \left| \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad Q_{\text{общ}} = \int_0^\infty Q dx, \quad Q_{\text{сум}} = \int_0^t Q_{\text{общ}} dt.$$

Профили Q для различных времен t показывают, что усиление кольтационных и ослабление суффозионных эффектов приводит к уменьшению массообмена вещества через границу $y = 0$ в отдельно взятых точках x . Отметим,

что в пределах исследованных времен не наблюдается немонотонное изменение Q , что было обнаружено в задаче, когда смесь входила в область R^+ по всей ширине $0 \leq y \leq h$, $x = 0$.

Можно заметить увеличение $Q_{общ}$ и $Q_{сум}$ при усилении суффозионных и ослаблении кольтатационных эффектов.

Далее уравнения (2), (3), (4), а также (6) решаются с полосообразным источником, т.е. условие (1) заменяется на

$$c = \begin{cases} 0, & \text{если } x = 0, \quad 0 \leq y < \gamma_1 h, \quad \gamma_2 h < y \leq h, \\ c_0, & \text{если } x = 0, \quad \gamma_1 h \leq y \leq \gamma_2 h, \quad c_0 = \text{const}, \quad \gamma_1, \gamma_2 \leq 1. \end{cases} \quad (7)$$

По сравнению с точечным источником здесь профили c/c_0 занимают более широкую область как в R^+ , так и в R^- . За счет кольтатационных эффектов происходит значительное уменьшение пористости в R^+ . При этом, чем значительнее эффекты кольтатации и чем слабее эффекты суффозии, тем значительнее уменьшение ε . Однако, размеры зоны изменения пористости уменьшаются. Сказанное можно интерпретировать еще и так: кольтатационные эффекты действуют как противоположный, суффозионные эффекты как благоприятствующий фактор диффузионному переносу вещества в пористой среде. Уменьшение пористости приводит к уменьшению проницаемости среды, что в свою очередь означает рост фильтрационного сопротивления среды.

Рассмотрим математическую модель кольтатационно-суффозионной фильтрации с учетом предельного суффозионного градиента давления (ПСГД). ПСГД впервые был введен в работах Б.Х.Хужаёрова. В качестве балансового уравнения для простоты принимаем обычное уравнение баланса вещества.

Уравнения кольтатационно-суффозионной фильтрации в R^+ можно записать в виде (2), (6), а в качестве (3) принимаем

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \begin{cases} \omega_1(\varepsilon_0 - \varepsilon)(|\nabla p| - |\nabla p_c|) - \omega_2 \varepsilon c, & \text{если } |\nabla p| > |\nabla p_c|, \\ -\omega_2 \varepsilon c, & \text{если } |\nabla p| \leq |\nabla p_c|. \end{cases} \quad (8)$$

В такой постановке задача решается для случая точечного источника. ∇p_c существенно не меняет распределение c/c_0 , что неоднократно ранее подтверждалось при решении одномерных задач.

В отличие от случая $\nabla p_c = 0$ здесь мы можем отличить две зоны с разными темпами изменения ε . В первой зоне значения ε за счет кольтатационных эффектов значительно уменьшаются, а во второй – можно наблюдать незначительное изменение ε . Общая граница зон на поверхностях характеризуется резким скачком значений ε .

В характере изменения Q можно обнаружить относительный излом, что объясняется достижением фронта превышения $|\nabla p|$ над $|\nabla p_c|$ границы $y = 0$

(Рис.2,а). При малых временах, когда фронт $|\nabla p| > |\nabla p_c|$ еще не достиг границы $y=0$, темп изменения Q является относительно однородным. В зоне отсутствия суффозии (зона с чистой кольматацией) $|\nabla p| \leq |\nabla p_c|$ относительный массообмен Q существенно меньше, чем в зоне с $|\nabla p| > |\nabla p_c|$. При уменьшении эффектов суффозии и увеличении эффектов кольматации в точках $x > 0$ значения Q уменьшаются.

В отдельно взятых точках общей границы R^+ и R^- можно наблюдать увеличение Q . В точке $x=0, y=0$ наблюдается равномерное увеличение Q , в то время как в точках $x > 0, y=0$ получен пульсирующий темп роста Q (Рис.2,б). Такая динамика объясняется тем, что $|\nabla p|$ в различных точках R^+ преодолевая $|\nabla p_c|$ переходит на другой режим.

Пульсирующий темп изменения Q отражается на динамику $Q_{\text{общ}}$, однако суммарный относительный расход $Q_{\text{сум}}$ малочувствителен пульсирующий динамике Q , т.е. пульсации темпа увеличения Q в $Q_{\text{сум}}$ в значительной степени сглаживаются за счет интегрирования.

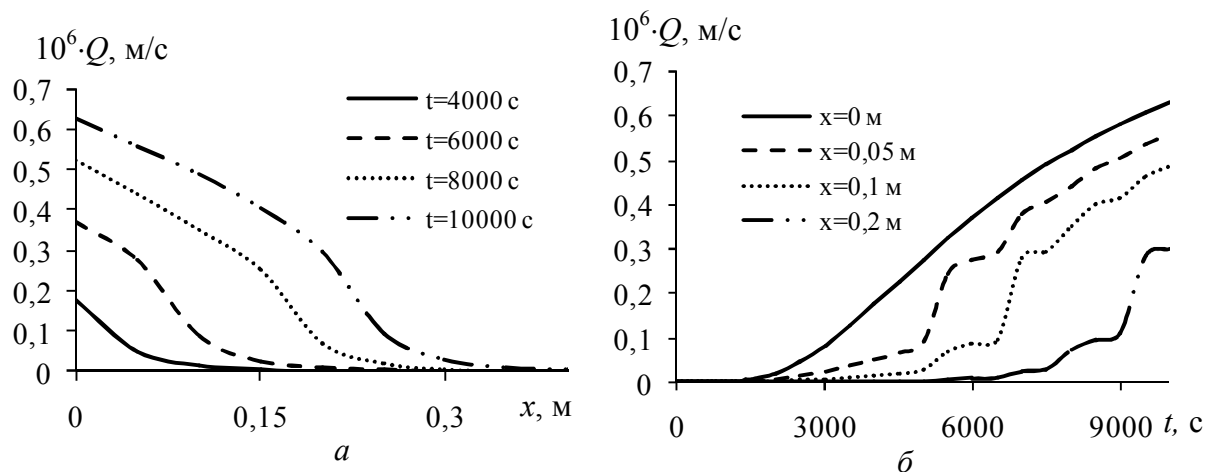


Рис. 2. Изменение относительного расхода вещества Q на границе областей R^+ и R^- в различные моменты времени (а) и изменение Q по t в различные x (б) при $D_1 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_2 = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_3 = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\omega_1 = 0,1 \text{ м}/(\text{МПа} \cdot \text{с})$; $\omega_2 = 0,1 \text{ с}^{-1}$.

На рис.3 приведены кривые равных уровней $|\nabla p|$. Из представленных кривых можно четко проследить характер распространения фронта смены режима $|\nabla p| \leq |\nabla p_c|$ на $|\nabla p| > |\nabla p_c|$. Ослабление суффозионных и усиление кольматационных эффектов приводит к замедлению распространения этого фронта.

Далее решена двумерная задача фильтрации с ПСГД в случае полосообразного источника.

Роль ∇p_c на c/c_0 , как и в предыдущих случаях, здесь особо не проявляется. По сравнению с точечным граничным источником пористость умень-

шается в относительно большей зоне, ширина зоны значительно больше. На поверхностях можно обнаружить четкую границу, разделяющую области с $|\nabla p| > |\nabla p_c|$ и $|\nabla p| \leq |\nabla p_c|$. Поле градиентов давления также занимает более широкую область в R^+ и значения ∇p в соответствующих точках больше, чем в случае точечного источника при одинаковых других параметрах задач.

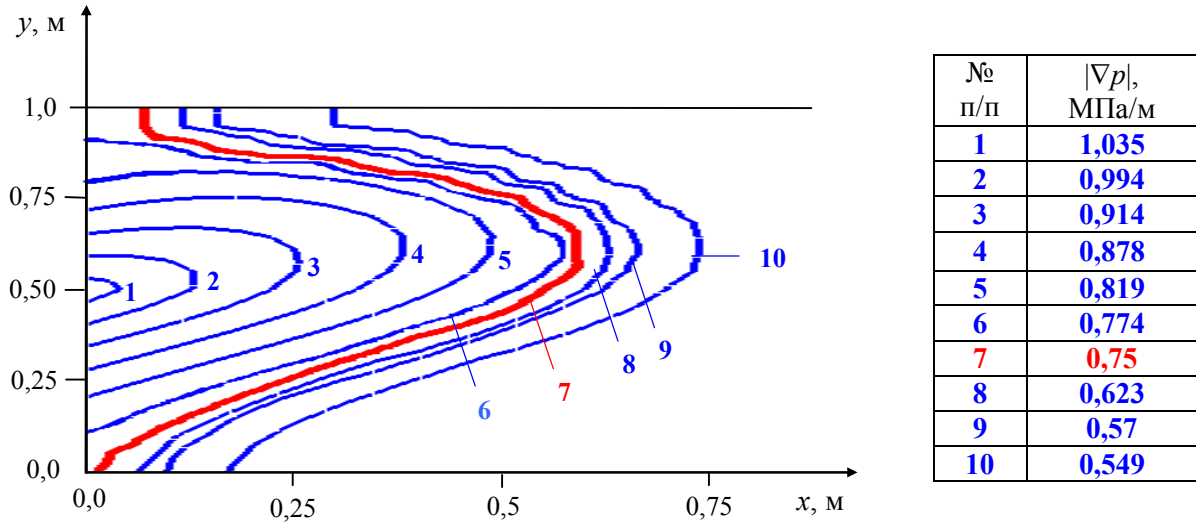


Рис.3. Линии равных уровней $|\nabla p|$ при $t = 5000$ с, $\omega_1 = 0,1$ м/(МПа·с); $\omega_2 = 0,1$ с⁻¹.

Исследован случай, когда D_3 меньше, чем D_2 . На поверхностях концентрации c/c_0 на $y=0$ можно заметить разрыв градиента концентрации, т.е. $\partial c/\partial y$ терпит разрыв. Поля пористости и градиента давления существенно не изменяются.

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

Жидкость движется в направлениях x и y в области R^+ . В R^- области также происходит конвективно-диффузионный, кольматационно-суффозионный перенос вещества. Учитывая плохую проницаемость R^- , предположим, что $v_{2x} < v_{1x}$, $v_{2y} < v_{1y}$, $D_{2x} < D_{1x}$, $D_{2y} < D_{1y}$, где v_{ix} , v_{iy} ($i=1, 2$) – компоненты скорости фильтрации в R^+ и R^- , D_{ix} , D_{iy} – продольный и поперечный коэффициенты диффузии в R^+ и R^- (здесь и далее $i=1$ соответствует R^+ , а $i=2$ – R^-).

С учетом вышеуказанного, процесс переноса вещества в R^+ и R^- можно описать уравнениями

$$\varepsilon_{0i} \frac{\partial c_i}{\partial t} + v_{ix} \frac{\partial c_i}{\partial x} + v_{iy} \frac{\partial c_i}{\partial y} = \varepsilon_{0i} \left\{ D_{ix} \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + D_{iy} \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} \right\} + \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t}, \quad i=1, 2, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} = \omega_1 (\varepsilon_{0i} - \varepsilon_i) |\nabla p_i| - \omega_2 \varepsilon_i c_i, \quad i=1, 2, \quad (10)$$

где c_i – объемные концентрации твердых частиц в жидкости, ε_{0i} , ε_i – первоначальные и текущие пористости, $|\nabla p_i|$ – модули градиента давлений p_i .

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

$$v_{ix} = -\frac{k_i(\varepsilon_i)}{\mu} \frac{\partial p_i}{\partial x}, \quad v_{iy} = -\frac{k_i(\varepsilon_i)}{\mu} \frac{\partial p_i}{\partial y}, \quad i=1, 2, \quad (11)$$

где μ – вязкости жидкости, $k_i(\varepsilon_i)$ – коэффициенты проницаемости областей R^+ и R^- , которые за счет кольматационно-суффозионных эффектов являются функциями ε_i .

Используя уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho v_{1x})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_{1y})}{\partial y} = -\frac{\partial(\rho \varepsilon_1)}{\partial t},$$

уравнения состояния упругой жидкости и упругой пористой среды

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta_{ж}(p_1 - p_0)], \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_{01} + \beta_{c1}(p_1 - p_0)$$

получаем уравнения пьезопроводности в виде

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = \chi_1 \left((\varepsilon_{01} + \beta_1^*(p_1 - p_0)) \left(\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_1}{\partial y^2} \right) + \beta_1^* \left(\left(\frac{\partial p_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p_1}{\partial y} \right)^2 \right) \right),$$

где ρ – плотность жидкости, $\beta_{ж}$ – коэффициент объемного сжатия жидкости, β_{c1} – коэффициент упругости области R^+ , ρ_0 – первоначальная плотность жидкости, p_0 – первоначальное давление, $\chi_1 = \frac{k_{01}}{\mu \beta_1^*}$.

Как и в теории упругого режима в последнем уравнении можно отбросить квадратичные члены как второго порядка малости, что дает

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = \chi_1^*(p_1) \left(\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_1}{\partial y^2} \right), \quad \chi_1^*(p_1) = \chi_1 (\varepsilon_{01} + \beta_1^*(p_1 - p_0)). \quad (12)$$

Для определения давления в области R^- аналогичным образом получается уравнение пьезопроводности.

Итак, получаем систему уравнений кольматационно-суффозионного переноса вещества в зонах R^+ и R^- , состоящую из уравнений баланса (9), уравнений кинетики (10), законов Дарси (11) и уравнений пьезопроводности (12).

Система уравнений решается методом конечных разностей. На основе численных экспериментов определены поля концентрации, градиента давления, пористости и скорости фильтрации в обеих областях. На поверхностях можно заметить увеличение концентрации вещества в областях R^+ и R^- , причем при малых x переход вещества в R^- становится значительным.

Усиление эффектов суффозии и кольматации существенно влияют на распределение концентрации вещества в R^+ и следовательно в R^- . На границе зон R^+ и R^- значения градиента давления увеличиваются за счет слабой про-

нищаемости зоны R^- . В точке $(0, 0)$ градиент давления уменьшается по времени.

Относительный расход вещества Q через границу $y=0$ определяется как

$$Q = \left(v_{2y} c_2 + D_3 \left| \frac{\partial c_2}{\partial y} \right| \right) \Big|_{y=0}.$$

Установлено, что относительный общий расход немонотонно растет по времени. При этом с усилением эффектов суффозии $Q_{общ}$ имеет более ускоренный темп роста, а с усилением эффектов кольматации темп роста $Q_{общ}$ ослабляется. Такая динамика наблюдается и для $Q_{сум}$.

В третьей главе диссертации **«Решение задач фильтрации суспензии в пористой среде с подвижной и неподвижной жидкостью на основе обобщенного уравнения»** процесс фильтрации суспензий изучается на основе схематизации насыщения порового объема по Ю.М.Шехтману. В отличие от предыдущих исследований здесь вводятся различные поля концентраций осевшей массы. Уравнение баланса массы записывается относительно концентрации твердого взвешенного вещества в движущейся смеси с учетом кинетики насыщенности осевшими частицами в рыхлом теле. Рассмотрены различные варианты подачи смеси в пористую среду: точечная, по всей ширине среды, по полосе.

Область исследования задачи, как и в гл.2, состоит из двух частей.

Процесс кольматационно-суффозионного переноса вещества в R^+ можно описать уравнениями

$$q(t) \frac{\partial \delta}{\partial x} = [m_0 \delta - m_0(1-\varepsilon)] \frac{\partial \zeta}{\partial t} - m_0(1-\zeta) \frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_1 \frac{\partial \delta}{\partial x} \right] + D_2 \frac{\partial^2 \delta}{\partial y^2}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\omega_0}{1 + \gamma |\nabla p|} \delta - \omega_1 |\nabla p| \zeta, \quad (14)$$

$$v_0 = K(m) (|\nabla p| - |\nabla p_0|), \quad K(m) = k_0 m = k_0 m_0 (1 - \zeta(1 - \varepsilon)), \quad (15)$$

где ζ – насыщенность осевшими частицами в рыхлом теле; δ – объемная концентрация твердого взвешенного вещества в движущейся смеси; m_0 , m – первоначальная и текущая пористости среды; ω_0 , ω_1 – параметры, характеризующие интенсивность кольматации и суффозии, соответственно; ∇p_0 – предельный градиент давления по потоку; $q(t)$ – суммарный расход жидкой и твердой фаз через единичную площадь поперечного сечения пористой среды; γ – параметр, характеризующий интенсивность влияния ∇p на кольматацию; v_0 – скорость фильтрации, постоянная, ε – пористость осевшей массы, D_1 – коэффициент гидродинамической дисперсии $D_1 = D_0 + \frac{\lambda v_0}{m}$, $D_0 = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$ – коэффициент рассеивания, v_0/m – физическая скорость движения жидкости.

Процесс переноса вещества в R^- можно описать обычным уравнением диффузии с некоторым эффективным коэффициентом диффузии D_3

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2 \delta}{\partial y^2}, \quad (x, y) \in R^-. \quad (16)$$

В область R^+ начиная с $t > 0$ через границу $x = 0$, $0 \leq y \leq h$ поступает жидкость с концентрацией твердых частиц $\delta_0 = \text{const}$.

Система уравнений (13) – (16) решается методом конечных разностей. Результаты расчетов показывают, что в R^+ формируется зона увеличения концентрации, которая расширяется с увеличением времени. При увеличении эффектов суффозии, уменьшении эффектов кольматации зона продвижения δ/δ_0 заметно расширяется. Это можно объяснить тем, что при уменьшении эффектов кольматации относительно больше частиц остается во взвешенном состоянии и эти частицы за счет конвекции и гидродинамической дисперсии переносятся в направлении движения жидкости. Зона увеличения ζ продвигается в направлении движения жидкости, увеличение эффектов кольматации способствует относительно большему осаждению частиц, а увеличение эффектов суффозии, наоборот, приводит к уменьшению значений поля ζ . Вблизи $y = 0$ можно заметить значительные деформации поверхностей ζ , что обусловлено массопереносом из R^+ в R^- .

Сначала образуются большие Q при малых x , с увеличением t эти значения постепенно уменьшаются, в то время как при относительно больших x увеличение Q продолжается, т.е. в динамике Q наблюдается немонотонность (Рис.4). Немонотонные явления в динамике $Q_{\text{общ}}$ и $Q_{\text{сум}}$ не наблюдаются. Темп увеличения $Q_{\text{общ}}$ постоянно уменьшается, а в темпе $Q_{\text{сум}}$ наблюдается постоянное увеличение.

Далее решаются задачи фильтрации в среде в случае точечного режима подачи смеси и при подаче неоднородной жидкости через полосу.

Оценены также такие характеристики переноса частиц и движения жидкости как δ/δ_0 , ζ , $|\nabla p|$, динамика Q через отдельные точки общей границы зон, его профили, $Q_{\text{общ}}$ и $Q_{\text{сум}}$. Результаты показывают, что когда жидкость с частицами подается через полосу границы $x = 0$ в R^+ , характеристики переноса увеличиваются по сравнению со случаем точечного режима подачи. Однако характеристики при этом меньше, чем в случае подачи через всю границу $x = 0$, $0 \leq y \leq h$.

Проанализирована задача с ПСГД. В этой постановке система уравнений состоит из (13), (15), (16), вместо (14) используется уравнение кинетики насыщенности осевшими частицами в рыхлом теле, в виде

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \begin{cases} \frac{\omega_0}{1 + \gamma |\nabla p|} \delta - \omega_1 (|\nabla p| - |\nabla p_c|) \zeta & \text{если } |\nabla p| > |\nabla p_c|, \\ \frac{\omega_0}{1 + \gamma |\nabla p|} \delta & \text{если } |\nabla p| \leq |\nabla p_c|, \end{cases} \quad (17)$$

где $|\nabla p_c|$ – модуль параметра ПСГД.

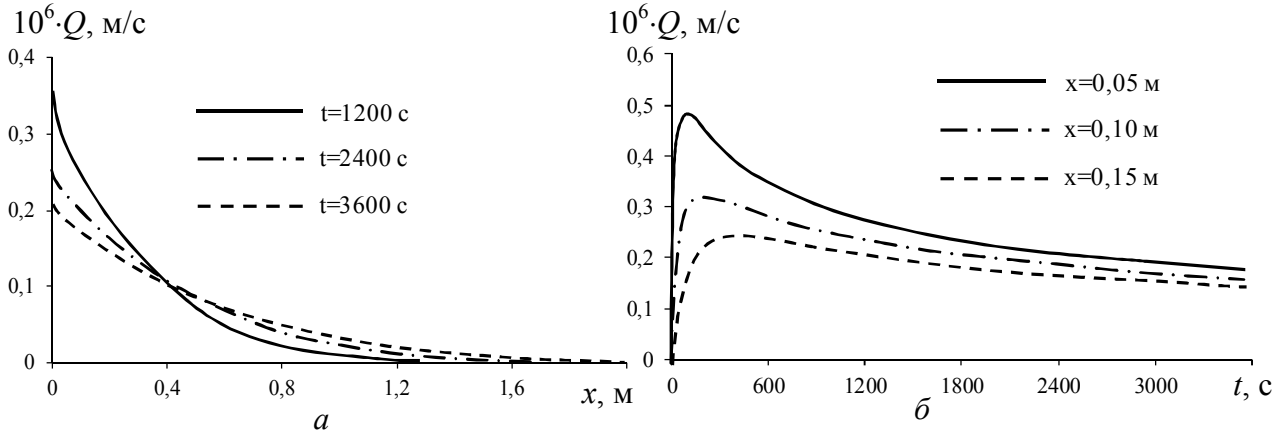


Рис.4. Изменение относительного расхода вещества Q на границе областей R^+ и R^- в различные моменты времени (а) и изменение Q по t в различные x (б) при $D_0 = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_2 = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $D_3 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\omega_0 = 0,05 \text{ с}^{-1}$, $\omega_1 = 0,05 \text{ м}/(\text{МПа} \cdot \text{с})$.

Поскольку здесь в качестве нового параметра используется $|\nabla p_c|$, основное внимание уделим на его влияние. Результаты показывают, что на поле δ/δ_0 влияние $|\nabla p_c|$ не очень заметно, что объяснено диффузионным размытием поля концентрации. В отличие от результатов с $|\nabla p_c| = 0$, можно заметить существенное увеличение значений ζ . Так, если при $|\nabla p_c| = 0$ максимальное значение ζ было равно $\sim 0,0176$, то в данном случае имеем $\sim 0,1513$. В настоящем случае действие $|\nabla p_c|$ проявляется еще и в виде резкого уменьшения ζ на фронте возникновения суффозии. Значительное увеличение $|\nabla p|$ при $|\nabla p_c| \neq 0$ и тех же остальных параметрах способствует росту фильтрационного сопротивления среды при учете ПСГД. Анализ результатов показывает, что учет $|\nabla p_c|$ приводит к значительному сокращению распространения Q вдоль x .

В задаче с точечной подачей жидкости установлено, что подход полей δ/δ_0 , ζ , $|\nabla p|$ к общей границе зон среды задерживается. Соответственно задерживается появление Q , $Q_{\text{общ}}$, $Q_{\text{сум}}$ и уменьшаются их значения, ступенчатые изменения ослабевают.

В четвертой главе диссертации «Составление и анализ математических моделей фильтрации суспензий в пористой среде с образованием осадка» выведены уравнения фильтрации суспензии с учетом сжимаемости несущей фазы, построены модель фильтрации суспензии с образованием консолиди-

рующуюся осадка, с использованием принципов механики многофазных континуумов построена модель фильтрации двухкомпонентной суспензии в пористой среде с образованием двух типов осадка, отличающихся по своим структурам и свойствам.

Поровый объем среды заполнен следующими составляющими: 1) подвижная жидкость; 2) взвешенные частицы примесей, перемещающиеся вместе с потоком жидкости; 3) неподвижная жидкость, связанная осевшими частицами; 4) неподвижные частицы примесей, осевшие в межзерновом пространстве.

Степень заполнения порового объема частями фильтруемой системы определяется объемными долями S_k

$$S_k = \frac{V_k}{V_{пор}}, \quad k = 1, 2, 3, 4, \quad (18)$$

где V_k - объем k -ой части фильтруемой системы, $V_{пор}$ - объем пор элементарного объема пористой среды (Рис.5). Составляющие фильтруемой среды условно назовем фазами.

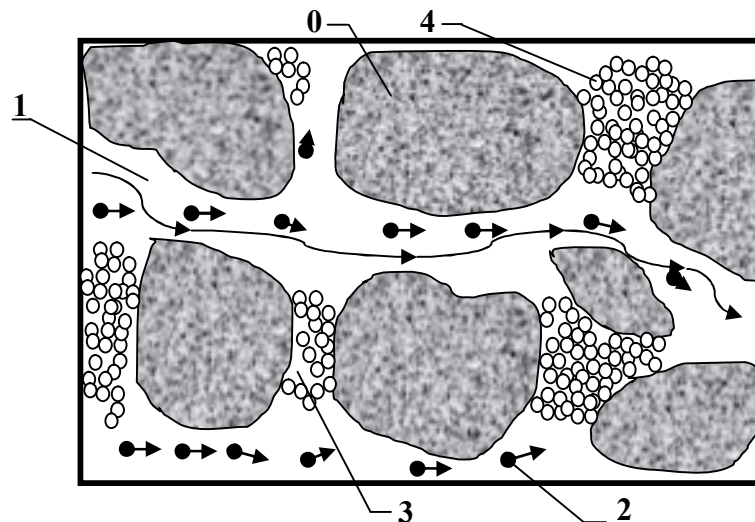


Рис. 5. Схема заполнения порового объема среды. 0 - зерна пористой среды, 1 - подвижная жидкость, 2 - взвешенные частицы примесей, перемещающиеся вместе с потоком жидкости, 3 - неподвижная жидкость, связанная с осевшими частицами, 4 - неподвижные частицы примесей, осевшие в межзерновом пространстве.

Рассматривается односкоростная модель, когда скорости жидкости и частиц считаются равными. Тогда скорости фаз 1, 2 определяются через общую скорость следующим образом

$$\vec{U}_k = \frac{S_k}{S_1 + S_2} \vec{U}, \quad k = 1, 2. \quad (19)$$

Связь скорости фильтрации $\vec{U}$ с градиентом давления p определяется законом Дарси

$$\vec{U} = -\frac{k(S_3, S_4)}{\mu(c)} \nabla p, \quad (20)$$

где $k(S_3, S_4)$ – проницаемость среды, $\mu(c)$ – вязкость суспензии, c – концентрация частиц в подвижной жидкости, $c = S_2/(S_1 + S_2)$.

Напишем систему уравнений фильтрации рассматриваемой четырехфазной среды. Уравнения сохранения массы (уравнения неразрывности) с учетом межфазного обмена можно записать в виде

$$\begin{aligned} m_0 \frac{\partial S_1}{\partial t} &= -\operatorname{div}((1-c)\vec{U}) - J_{1,3} , \\ m_0 \frac{\partial S_2}{\partial t} &= -\operatorname{div}(c\vec{U}) - J_{2,4} + J_{4,2} , \\ m_0 \frac{\partial S_3}{\partial t} &= J_{1,3} , \\ m_0 \frac{\partial S_4}{\partial t} &= J_{2,4} - J_{4,2} , \end{aligned} \quad (21)$$

где m_0 – пористость среды в начале процесса, когда осадкообразования нет, $J_{1,3}$ – плотность потока жидкости из первой в третью фазу, $J_{2,4}$ – плотность потока коагуляции – перехода частиц из подвижного состояния (вторая фаза) в неподвижное (четвертая фаза), $J_{4,2}$ – плотность потока суффозии, т.е. перехода частиц из неподвижного состояния (четвертая фаза) в подвижное (вторая фаза).

Для получения уравнения относительно p можно использовать первое уравнение (21), закон Дарси (20), уравнение состояния для слабосжимаемых жидкостей $\rho_f = \rho_0[1 + \beta_f(p - p^0)]$ (с $p^0 = 0$) и соотношение для

$J_{1,3} = \frac{\varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0}(J_{2,4} - J_{4,2})$, где $\beta_f = \text{const}$. В одномерном случае получаем уравнение

$$m_0 \frac{\partial [S_1(1 + \beta_f p)]}{\partial t} = \frac{k_0}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{(1 + \beta_f p) S_1 [1 - \sqrt{1 - (S_1 + S_2)}]^3}{S_1 + \frac{7}{2} S_2} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + Q, \quad (22)$$

где

$$Q = \frac{\varepsilon_0(1 + \beta_f p)}{1 - \varepsilon_0} \left\{ \beta_s S_4 - \alpha_s \frac{S_2}{S_1 + S_2} + \left(\beta_d S_4 - \alpha_d \frac{k_0}{\mu_0} S_2 \frac{[1 - \sqrt{1 - (S_1 + S_2)}]^3}{S_1 + \frac{7}{2} S_2} \right) \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right| \right\},$$

ε_0 – пористость осадка, $\alpha_s, \alpha_d, \beta_s, \beta_\alpha$ – постоянные.

К уравнениям (21) надо добавить соотношение

$$\sum_{k=1}^4 S_k = 1. \quad (23)$$

Система уравнений (21) (в одномерном случае), (22) решается методом конечных разностей с начальными и граничными условиями

$$p(0, x) = 0, \quad p(t, 0) = p_0, \quad p(t, \infty) = 0, \quad p_0 = \text{const.} \quad (24)$$

$$S_1(0, x) = 1, \quad S_2(0, x) = S_3(0, x) = S_4(0, x) = 0, \quad \left. \frac{S_2}{S_1 + S_2} \right|_{x=0} = c_0 = \text{const.} \quad (25)$$

Определив поле давления из (22), находим U из закона Дарси. Затем решая второе, третье, четвертое уравнения системы (21) и используя (23) находим S_k , $k = \overline{1, 4}$.

Проводились численные эксперименты при $\beta_f \neq 0$ для различных значений остальных параметров. Для этого случая общие закономерности изменения насыщенностей остаются без изменения, однако скорость фильтрации не является постоянной по x .

В работе Носкова М.Д. и др. считается, что образовавшийся в пористой среде осадок частиц имеет постоянную структуру, которая в процессе фильтрации не меняется. Однако под воздействием гидродинамических сил осадок меняет свою структуру, происходит переупаковка частиц, вследствие чего его пористость уменьшается. Другими словами, осадок уплотняется, происходит его консолидация.

В пористой среде за исключением тупиковых, т.е. мертвых зон осадок подвергается всестороннему сжатию давлением суспензии со стороны подвижной части. Поэтому сделаем допущение, что консолидация осадка происходит под действием давления подвижной суспензии. По аналогии с работой Копейкиной А.А. и др. примем следующий закон изменения пористости осадка

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{1 + \varepsilon_\alpha p}, \quad (26)$$

где ε_α – коэффициент, учитывающий относительное изменение пористости осадка при единичном сжимающем усилии.

С учетом консолидации осадка напомним систему уравнений в виде

$$\begin{aligned} m_0 \frac{\partial S_1}{\partial t} &= -\text{div}((1-c)\vec{U}) - J_{1,3} + J_{3,1}, \\ m_0 \frac{\partial S_2}{\partial t} &= -\text{div}(c\vec{U}) - J_{2,4} + J_{4,2}, \\ m_0 \frac{\partial S_3}{\partial t} &= J_{1,3} - J_{3,1}, \\ m_0 \frac{\partial S_4}{\partial t} &= J_{2,4} - J_{4,2}. \end{aligned} \quad (27)$$

Заметим, что приток жидкости из осадка в подвижную жидкость учитывается и в уравнении для третьей фазы.

В (27) $\vec{U}$ определяется из закона Дарси (20).

Суммируя все уравнения (27) и учитывая, $\sum_{k=1}^4 S_k = 1$ получим

$$\operatorname{div}\left(\frac{k(S_1, S_2)}{\mu(c)} \operatorname{grad} p\right) = 0 . \quad (28)$$

Учитывая зависимости $k(S_1, S_2)$ и $\mu(c)$ уравнение (28) принимает вид

$$\operatorname{div}(\Omega(S_1, S_2) \operatorname{grad} p) = 0 , \quad (29)$$

где

$$\Omega(S_1, S_2) = \frac{S_1 + S_2}{S_1 + \frac{7}{2} S_2} \left[1 - \sqrt{1 - (S_1 + S_2)} \right]^3 .$$

С целью оценки влияния консолидации осадка на процессы переноса жидкости и частиц в пористой среде проводились вычислительные эксперименты с предложенной выше моделью.

Результаты расчетов показывают, что за счет консолидации осадка, относительное содержание связанной неподвижной жидкости уменьшается. Высвободившаяся из осадка жидкость переходит в первую фазу, увеличивая ее насыщенность по сравнению со случаем отсутствия консолидации. Кинетика осаждения частиц из второй фазы в четвертую остается практически неизменной. В результате консолидации общий объем осадка также уменьшается.

Реальные суспензии, как правило, являются многокомпонентными. Фракции суспензии, т.е. взвешенные в несущей фазе твердые частицы могут отличаться геометрическими (полудисперсность), физико-химическими (плотность, степень гидрофильности поверхности и др.), электрокинетическими и др. свойствами. Наиболее простым видом многокомпонентных суспензий являются бинарные, состоящие из двух дисперсных фракций, отличающихся концентрациями, адгезионными, кинетическими свойствами.

Система уравнений, описывающих изменение насыщенностей, может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} m_0 \frac{\partial S_1}{\partial t} &= -\operatorname{div}((1-c)\vec{U}) - J_{1,31} - J_{1,32} , \\ m_0 \frac{\partial S_{21}}{\partial t} &= -\operatorname{div}(c_1 \vec{U}) - J_{21,41} + J_{41,21} , \\ m_0 \frac{\partial S_{22}}{\partial t} &= -\operatorname{div}(c_2 \vec{U}) - J_{22,42} + J_{42,22} , \\ m_0 \frac{\partial S_{31}}{\partial t} &= J_{1,31} , \\ m_0 \frac{\partial S_{32}}{\partial t} &= J_{1,32} , \\ m_0 \frac{\partial S_{41}}{\partial t} &= J_{21,41} - J_{41,21} , \\ m_0 \frac{\partial S_{42}}{\partial t} &= J_{22,42} - J_{42,22} , \end{aligned} \quad (30)$$

где $J_{1,31}$, $J_{1,32}$ – плотности потоков жидкости из подвижной суспензии в осадки первого и второго видов, соответственно; $J_{21,41}$ – плотность потока частиц первого типа из подвижной суспензии в осадок первого вида; $J_{41,21}$ – плотность потока частиц из осадка первого вида в подвижную суспензию; $J_{22,42}$ – плотность потока частиц второго типа из подвижной суспензии в осадки второго вида; $J_{42,22}$ – плотность потока частиц из осадка второго вида в подвижную суспензию, c – общая объемная концентрация частиц в подвижной суспензии, состоящая из концентрации частиц первого c_1 и второго c_2 типа, т.е. $c = c_1 + c_2$.

Приведенная выше задача решается в следующей последовательности. Сначала решается уравнение (29) (в одномерном случае) при условиях (24) и определяется распределение давления. Из закона Дарси определяется скорость фильтрации U . Далее решается система уравнений (30) относительно насыщенных с начальными и граничными условиями.

Результаты показывают, что за счет роста фильтрационного сопротивления среды из-за осаждения частиц и образования осадка с определенной структурой происходит неравномерное распределение давления по длине среды, уменьшение проницаемости среды. Концентрационные профили продвигаются в направлении движения жидкости. Общий объем осадка (сумма осадков двух видов) также увеличивается с увеличением времени и его зона расширяется. За счет интенсификации осаждения частиц первого типа в их насыщенности в подвижной фазе отмечается уменьшение, в то время как в динамике насыщенности подвижными частицами второго типа не происходит особых изменений.

Таким образом, в зависимости от кинетики осадкообразования при фильтрации бинарной суспензии может происходить рост осадков различных видов, соответствующих различным типам частиц в суспензии. Объемы и структуры осадков определяются пористостью и кинетическими параметрами, входящими в модель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе на тему «Усовершенствование и анализ математических моделей фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах», сводятся к следующим выводам:

1. Поставлены и численно решены задачи кольматационно–суффозионной фильтрации в двумерной области, состоящей из зон с подвижной и неподвижной жидкостью, для различных граничных концентрационных режимов. Показано, что ослабление суффозионных и усиление кольматационных эффектов приводит к более интенсивному отложению частиц в R^+ , что уменьшает зону увеличения c/c_0 , уменьшает ε и увеличивает ∇p , уменьшается относительный массообмен через общую границу областей R^+ и R^- . Полосообразный

граничный концентрационный режим по сравнению с точечным режимом приводит к более интенсивному распространению вещества в R^+ и R^- : c/c_0 охватывает более широкую область в $R^+ \cup R^-$, ε более значительно уменьшается, а ∇p более значительно увеличивается. По сравнению с точечным граничным концентрационным режимом получается более интенсивный перенос вещества через общую границу R^+ и R^- , что отражается также на $Q_{\text{общ}}$, $Q_{\text{сум}}$.

2. Учет ПСГД приводит к разделению области фильтрации на две зоны: а) с $|\nabla p| \leq |\nabla p_c|$; б) $|\nabla p| > |\nabla p_c|$, где динамики фильтрационных характеристик существенно могут отличаться. Концентрационное поле, как и в одномерном случае, реагирует слабо на ∇p_c , что может быть объяснено влиянием диффузионных эффектов, демпфирующие влияющие на концентрационное поле. Обнаружен пульсирующий темп увеличения Q , $Q_{\text{общ}}$ за счет ПСГД, однако $Q_{\text{сум}}$ малочувствителен на ПСГД.

3. Усовершенствована математическая модель кольматационно-суффозионной фильтрации в пористой среде, состоящей из зон с подвижной и малоподвижной жидкостью. Выявлено, что на границе зон с подвижной и малоподвижной жидкостью происходит конвективно-диффузионный перенос вещества, что сильно влияет на профили концентрации вещества, пористости, градиента давления в зоне с подвижной жидкостью.

4. Составлена система уравнений кольматационно-суффозионной фильтрации в двухзонной пористой среде, состоящая из уравнения баланса Ю.М.Шехтмана, обобщенного уравнения кинетики, учитывающего динамические факторы и ПСГД, обобщенного закона Дарси. Система уравнений реализована численно и определены поверхности концентрации твердых частиц в жидкости, насыщенность пористой среды осевшими частицами, текущий градиент давления, текущий, общий, суммарный относительный расходы твердых частиц через общую границу зон с подвижной и неподвижной жидкостью.

5. Разработана модель фильтрации суспензии в пористой среде с учетом сжимаемости несущей фазы суспензии и связанной с осадком неподвижной жидкости. Вычислительные эксперименты показали, что сжимаемость приводить к неоднородному распределению скорости фильтрации по простиранию пласта, на насыщенности среды различными фазами оказывает слабое влияние.

6. Разработана модель фильтрации суспензии с образованием консолидирующегося осадка. Вычислительные эксперименты показывают, что консолидация осадка приводит к высвобождению части неподвижной жидкости, связанной с осадком, и переходу ее в подвижное состояние, т.е. происходит массоперенос части жидкости из третьей в первую фазу. Консолидация осадка, как следствие отмеченного явления, приводит к общему уменьшению объема осадка.

7. Составлена модель фильтрации двухкомпонентной суспензии в пористой среде с образованием осадков различной структуры и разработана методика численного решения задачи. На основе численных экспериментов исследовано влияние кинетических коэффициентов на процессы массообмена между фазами, распределения насыщенностей фаз и другие гидродинамические характеристики. Установлено, что в зависимости от кинетики осадкообразования может происходить рост осадков различных видов, соответствующих различным типам частиц в суспензии. Объемы и структуры осадков определяются пористостью и кинетическими параметрами, входящими в модель.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc. 30.08.2018.FM/T.02.09 AT SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

SAMARKAND STATE UNIVERSITY

MAKHMUDOV JAMOL MAKHMUD UGLI

**IMPROVEMENT AND ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF
FILTRATION OF NON-HOMOGENEOUS LIQUIDS IN POROUS MEDIA**

01.02.05 – Fluid and gas mechanics

**DISSERTATION ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Samarkand - 2019

The subject of doctor of sciences (DSc) dissertation is registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan, number B2017.3.DSc/FM94.

The dissertation has been prepared the Samarkand State University.

The abstract of the dissertation is three languages (uzbek, russian, english (resume)) is posted on the website Scientific Council (www.samdu.uz) and the "Ziyonet" Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant: **Khuzhayorov Bakhtiyor Khuzhayorovich**
Doctor of physical and mathematical sciences, Professor

Official opponents: **Normurodov Chori Begalievich**
Doctor of physical and mathematical sciences

Ravshanov Normahmad
Doctor of technical sciences, Professor

Khuzhaev Ismatulla Kushaevich
Doctor of technical sciences, Senior researcher

Leading organization: **Tashkent institute of engineers of irrigation and mechanization in agriculture**

Defense will take place « 24 » may 2019 at 14⁰⁰ at the meeting of Scientific Council number DSc.30.08.2018.FM/T.02.09 Samarkand State University. (Address: University str. 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, tel: (+99866) 239-11-40, 239-12-47, fax: (+99866) 239-11-40, e-mail: devonxona@samdu.uz).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Samarkand State University (is registered № 28) (Address: University str. 15, Samarkand, 140104, Uzbekistan, tel: (+99866) 239-17-25).

Abstract of dissertation sent out on « 4 » may 2019 year
(Mailing report № 5 on « 3 » may 2019 year)



R.I.Khalmuradov
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 the DSc dissertation)

The aim of the research is to develop improved mathematical models of non-homogeneous liquids filtration in porous media, taking into account the macroscopic heterogeneity of the medium, dispersed liquids filtration with non-uniform distribution of the filtration velocity field, suspensions filtration taking into account the compressibility of the carrier phase and deposition consolidation, multicomponent liquids filtration with the formation of deposition of various structures.

The object of research is the porous media through which non-homogeneous liquids, in particular, suspensions are filtered.

The subject of research mathematical models, computational algorithms and hydrodynamic analysis of the processes of suspension filtration and the solute transport in a porous media.

The scientific novelty of the dissertation research is as follows:

the mathematical model of colmatation-suffusion filtration in a two-dimensional region consisting of zones with mobile and immobile (or slow-moving) fluid was improved taking into account (and without taking into account) the limiting suffusion pressure gradient;

the mathematical model of colmatation-suffusion filtration in a porous media with zones of mobile and immobile fluid based on the generalized equation of Yu.M. Shekhtman was improved;

mathematical model for suspension filtration in a porous media has been developed, taking into account the compressibility of the carrier phase of the suspension and stationary liquid associated with deposition;

improved mathematical model of suspension filtration with the formation of a consolidating deposition;

mathematical models of two-component suspension filtration in a porous media with the formation of deposition of various structures based on the principles of the mechanics of multiphase systems have been developed.

Implementation of research results.

On the bases of advanced mathematical models, efficient computational algorithms for numerical analysis of non-homogeneous liquids filtration in porous media:

advanced mathematical models for suspension filtration in a two-zone porous medium with mobile and immobile liquid were used in the research of the fundamental grant under the number BV-M-F4-001 “Mathematical models and efficient distributed computational algorithms for solving multidimensional problems of complex heat and mass transfer and mass exchange” (Ministry for the Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan, reference number 33-8 / 238 of January 15, 2019 of the year). As a result, it allowed to improve the mathematical models of complex dimensional problems of heat and mass transfer.

developed computational algorithms for the solution of suspension filtration problems taking into account deposition consolidation and filtration of a two-

component suspension, used in the research of the fundamental grant under the number BV-M-F4-001 “Mathematical models and effective distributed computational algorithms for solving multidimensional problems of complex heat and mass transfer” in developing algorithmic solution methods complex dimensional problems of heat and mass transfer (Ministry for the Development of Information Technologies and Communications Tang, a certificate №33-8 / 238 of 15 January 2019). As a result, computational algorithms have significantly reduced the computation time for solving problems of complex solute transfer in porous media;

improved mathematical models and numerical algorithms of filtration of non-homogeneous liquids in a porous media were used at the facilities of JSC “Uzneftegazdobycha” for the conditions of the North Urtabulak (well # 3), South Kemachi (well # 118), Shurtepa (well # 102) and Sarikum (well # 22) (JSC Uzbekneftegaz, reference No. 02 / 14-2-477 dated April 18, 2018) in calculating the filtration-capacitance properties of the reservoir using secondary and tertiary impact methods. As a result, this made it possible to develop optimal plans for geological and technical measures for acid effects on wells, taking into account the deposition of insoluble particles in the pores of the media;

improved mathematical models of suspension filtration and mass transfer in a porous media were used in the following international scientific journals: (Journal of Hydrology, T.468-469 (2012), IF = 1.563) in deriving mathematical models of the processes of infiltration and adsorption, (Journal of Porous Media, 4 (2014), IF = 0.504) in determining the temperature distribution in water-saturated porous media, (Journal of Porous Media, 5 (2014), IF = 0.504) in determining the dependence of the filtration coefficient on the suspension concentration and filtration rate. The use of scientific results allowed to derive the equations of infiltration and adsorption, to determine the fields of temperature distribution and filtration parameters of the media.

Publication of research results. On the topic of the thesis 35 scientific papers were published. From these, 1 monograph, 12 scientific articles, 3 in foreign, 9 in national journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of doctoral theses.

Structure and volume of the dissertation. The thesis, whose volume is 183 pages, consists of the introduction, four chapters, conclusion, list of references, applications.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; Part I)

1. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М. Математические модели фильтрации неоднородных жидкостей в пористых средах. Монография. Издательство «ФАН». - Ташкент, 2014. – 280 с.
2. Khuzhayorov B.Kh., Makhmudov J.M. Flow of Suspensions in 2D Porous Media with Mobile and Immobile Liquid Zones // Journal of Porous Media. - California, 2010. Vol. 13, - No. 5. - P. 423-437. (№ 3. Scopus. IF=0.504).
3. Khuzhayorov B.Kh., Makhmudov J.M., Zikiryaev Sh.Kh. Substance transfer in a porous medium saturated with mobile and immobile liquids // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, - New York, 2010. Vol. 83, Issue 2. - Pp. 263-270. (01.00.00; №7).
4. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Сулаймонов Ф.У. Перенос вещества в среде, состоящей из макропористой и микропористой цилиндрических зон // Узбекский журнал «Проблемы механики». - Ташкент, 2011. - №3-4. С.37-40. (01.00.00; №4).
5. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Файзиев Б.М. Фильтрация двухкомпонентных суспензий в пористой среде с двумя зонами осадкообразования // Узбекский журнал «Проблемы механики». - Ташкент, 2012. - №1. С.46-51. (01.00.00; №4).
6. Махмудов Ж.М. Задача фильтрации суспензии и переноса вещества в двухзонной пористой среде с учетом предельного суффозионного градиента давления // Узбекский журнал «Проблемы механики». - Ташкент, 2013. - № 2. - С. 23-27. (01.00.00; №4).
7. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Жаманкулова Ф.Э. Фильтрация суспензии в пористой среде с подвижной и неподвижной жидкостью // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2013. - №2. - С. 44-47. (01.00.00; №4).
8. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Файзиев Б.М., Сагдуллаев О.К. Задача фильтрации суспензии в пористой среде с модифицированной кинетикой осадкообразования // Научный вестник СамГУ. – Самарканд, 2013. - №3. - С.29-33. (01.00.00; №2).
9. Махмудов Ж.М. Гидродинамическое моделирование процессов фильтрации суспензии в неоднородных пористых средах // Узбекский журнал «Проблемы механики». - Ташкент, 2014. - № 2. - С. 56-61. (01.00.00; №4).
10. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Жаманкулова Ф.Э. Задача фильтрации суспензии в двухзонной пористой среде с учетом предельного суффозионного градиента давления // Научный вестник СамГУ. - Самарканд, 2014. - № 3. - С. 37-41. (01.00.00; №2).

11. Махмудов Ж.М., Жаманкулова Ф.Э. Задача фильтрации суспензии в двухзонной пористой среде с учетом предельного суффозионного градиента давления // Узбекский журнал «Проблемы механики». - Ташкент, 2014. - № 3-4. - С.63-66. (01.00.00; №4).
12. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Сайдуллаев У.Ж. Численное решение задачи фильтрации двухкомпонентных суспензий в пористой среде // Узбекский журнал «Проблемы механики». - Ташкент, 2016. - № 3. - С.110-114. (01.00.00; №4).
13. Makhmudov J.M., Saidullaev U.J., Khuzhayorov B.Kh. Mathematical modeling of deep-bed filtration of a two-component suspension through a porous medium // Fluid dynamics. 2017. Vol.52. - No.2. - Pp.299-308. (№11 – Springer, IF=0,608).

II бўлим (Part II; II часть)

14. Khuzhayorov B.Kh., Makhmudov J.M., Zikiryaev Sh.Kh. Modelling of solute transport processes in porous media with stagnant liquid zones // Abstracts of the third congress of the world mathematical society of Turkic countries, June 30 – July 4, 2009. Vol. 2. Pp. 159.
15. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М. Решение двухмерной задачи кольматационно-суффозионной фильтрации в двухзонной пористой среде // Материалы Международной науч.-тех. Конф. “Современные проблемы механики”, 23-24.10.2009. - Ташкент, 2009. - С. 207-211.
16. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Зикийев Ш.Х. Задачи переноса загрязняющих веществ в неоднородной пористой среде с учетом адсорбции и внутреннего массопереноса // Труды международной конф. «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2009», 18-21.09.2009. - Ташкент, 2009. - С. 303-306.
17. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М. Гидродинамическая модель очистки воды фильтрованием через пористую среду // Сборник материалов IV-международной конференции «Проблемы развития инженерных коммуникаций» 17-21.05.2010. - Самарканд, 2010. - С. 51-52.
18. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М. Математическое моделирование процессов фильтрации суспензии в пористой среде с учетом образования осадков // Труды научной конференции “Проблемы современной математики”, 22-23.04.2011. - Карши, 2011. С.543-547.
19. Махмудов Ж.М., Пардаев А.И., Шаимов К.М. Численное решение задачи фильтрации суспензии в пористой среде // Труды научной конференции “Проблемы современной математики”, 22-23.04.2011. - Карши, 2011. - С.431-434.
20. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М. Математическое моделирование фильтрации суспензии в пористой среде с учетом образования осадков // Материалы респб.науч.конф. “Актуальные вопросы математики, математического

- моделирования и информационных технологий”, 21-22.11.2012. - Термиз, 2012. - С.98-101.
21. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Абдунабиев А. О модели кольтматационно-суффозионной фильтрации в макроскопически неоднородной пористой среде // Труды международной научной конф. «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2012», 19-22.12.2012. - Ташкент, 2012. Том I. - С. 264-266.
 22. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Файзиев Б.М. Моделирование процессов фильтрации суспензии в пористой среде с образованием осадка // Труды международной научной конф. «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2012», 19-22.12.2012. - Ташкент, 2012. Том I. - С. 267-270.
 23. Khuzhayorov B.Kh., Makhmudov J.M., Sulaymonov F.U. 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.
 24. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Жаманкулова Ф.Э., Эшмуродов М.Х. Задача кольтматационно-суффозионного переноса веществ в двухзонной пористой среде с учетом предельного суффозионного градиента давления // Материалы международной научно-технической конференции «Современные проблемы механики грунтов и сложных реологических систем», 19-20.04.2013. - Самарканд, 2013. Книга 2. - С. 258-262.
 25. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М. Гидродинамическое моделирование процессов фильтрации суспензии в неоднородных пористых средах при заводнении нефтяных залежей // Тезисы докладов VIII Казахстанско-Российской международ.науч.-прак. конф. «Математическое моделирование в научно-технологических и экологических проблемах нефтегазовой отрасли», 20-21.06.2014. Казахстан, - Атырау, 2014. - С.130.
 26. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М. Математическое моделирование процессов фильтрации суспензии в пористой среде с подвижной и малоподвижной жидкостью с учетом предельного суффозионного градиента давления // Труды конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – аль-Хорезми 2014». 15-17.09.2014. - Ташкент, 2014. Том I. - С.175-178.
 27. Khuzhayorov B.Kh., Makhmudov J.M. Modelling of two-dimensional mass transport problem in porous media // Тезисы докладов международ. конф. «Прикладной и геометрический анализ», 22-25.09.2014. – Самарканд, 2014. - С.19.
 28. Махмудов Ж.М., Сулаймонов Ф.У. Решение задачи переноса вещества в цилиндрической двухслойной среде // «Современные методы математической физики и их приложения». Тез. Республиканской научной конференции с участием зарубежных ученых. 15-17.04.2015. - Ташкент, 2015. - С. 183-185.

29. Махмудов Ж.М. Задача кольматационно-суффозионной фильтрации в пористой среде с подвижной и малоподвижной жидкостью с учетом предельного суффозионного градиента давления // «Математика ва уни замонавий педагогик технологиялар ёрдамида ўқитиш муаммолари» Республика илмий амалий конференцияси материаллари. 2015 йил 25 апрель. Навоий, 2015. 133-135 б.
30. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Болкибоев О.Ш. Задача фильтрации суспензии в неоднородных пористых средах с учетом предельного суффозионного градиента давления // Материалы научной конференции «Актуальные вопросы анализа» 22-23.04.2016. - Карши, 2016. - С. 189-192.
31. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М., Сайдуллаев У.Ж. Численное моделирование фильтрации слабосжимаемой суспензии с образованием осадка внутри фильтра // Труды международной научной конф. “Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2016”. - Бухоро, 2016. - С. 150-155.
32. Махмудов Ж.М., Болкибоев О.Ш. Задача фильтрации суспензии в пористой среде с подвижной и малоподвижной жидкостью с учетом предельного суффозионного градиента давления // “Таълим, фан ва ишлаб чиқариш интеграциясида интеллектуал салоҳиятли ёшлар – мамлакат тараққиётининг муҳим омили” мавзусидаги XIII Республика илмий-амалий конференцияси материаллари, III қисм, Самарқанд, 2016 й. 232-234 бб.
33. Khuzhayorov B., Makhmudov J. Filtration of non-homogeneous liquids in porous media with forming a consolidating deposit // Abstracts of VI Congress of the Turkic World Mathematical Society. October 2-5, 2017. - Astana, Kazakhstan. - P. 325.
34. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М. Математическая модель фильтрации суспензии с образованием консолидирующегося осадка // Сборник докладов республиканской научно-практической конференции “Механика деформируемого твердого тела”. 25.10.2018. - Ташкент, 2018. Том I. - С.398-405.
35. Хужаёров Б.Х., Махмудов Ж.М. Численное решение задачи фильтрации двухкомпонентной суспензии в пористой среде // Свидетельство DGU 05955. Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Дата регистрации 10.01.2019. Номер заявки DGU 2018 1053.

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

Гувоҳнома №18-4025.

01.05.2019 йилда босишга рухсат этилди.
Шартли босма табағи 3,25. Қоғоз бичими 60x84_{1/16}.
“Times” гарнитураси. Адади 100 нусха. Буюртма №6/2.

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

