

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.T.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМЙ КЕНГАШ

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ

НАЗИРОВА ЭЛМИРА ШОДМОНОВА

СУЮҚЛИК ВА ГАЗЛАРНИНГ ФИЛЬТРАНИШ ЖАРАЁНИНИ
ТАДҚИҚ ҚИЛИШ УЧУН МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАР, СОНЛИ
УСУЛЛАР ВА ДАСТУРЛАР МАЖМУИ

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2019

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторский (DSc) диссертации

Content of the abstract Doctoral (DSc) Dissertation

Назирова Элмира Шодмоновна

Сууюқлик ва газларнинг филътрланиш жараёнини тадқиқ қилиш учун
математик моделлар, сонли усуллар ва дастурлар мажмуи.....3

Назирова Элмира Шодмоновна

Математическое модели, численные методы и комплекс программ для
исследования процессов фильтрации жидкостей и газов.....27

Nazirova Elmira Shodmonovna

Mathematical models, numerical methods and a complex program for research
processes of filtration of liquids and gases.....51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works.....55

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.T.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ

НАЗИРОВА ЭЛМИРА ШОДМОНОВНА

СУЮҚЛИК ВА ГАЗЛАРНИНГ ФИЛЬТРАНИШ ЖАРАЁНИНИ
ТАДҚИҚ ҚИЛИШ УЧУН МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАР, СОНЛИ
УСУЛЛАР ВА ДАСТУРЛАР МАЖМУИ

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2019

Техника фанлари бўйича фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.2.DSc/T170 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент ахборот технологиялари университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш web саҳифасида (www.tuit.uz) ва «Ziyonet» Ахборот таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: **Равшанов Нормаммад**
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Арипов Мирсаид**
физика математика фанлари доктори, профессор

Хужаев Исмадулла Кушаевич
техника фанлари доктори, к.и.х.

Ҳабибуллаев Иброҳим Ҳабибуллаевич
техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: **Самарқанд давлат университети**

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университетидаги DSc.27.06.2017.Т.07.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «__» _____ соат __ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (__ рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100202, Тошкент шаҳри, Амир Темур кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2019 йил «__» _____ куни тарқатилди.
(2019 йил «__» _____ даги __ рақамли реестр баённомаси.)

Р.Х.Хамдамов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

Ф.М.Нуралиев

Илмий даржалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д., доцент

А.М.Полатов

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда газ ва гидродинамик жараёнларнинг математик моделларини яратиш, суюқликлар ностационар фильтрацияси жараёнларининг математик моделларини такомиллаштириш, чизиқли ва чизиқсиз фильтрация масалаларини ечиш учун сонли усуллар ва инфокоммуникация технологиялари имкониятларидан кенг фойдаланишга ҳамда нефть-газ конлари ишлаши асосий кўрсаткичларини аниқлаш ва башоратлашнинг автоматлаштирилган тизимларини яратишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Дунёнинг ривожланган мамлакатларида, жумладан, АҚШ, Франция, Хитой, БАА, Эрон, Россия Федерацияси, Украина, Қозоғистон, Озарбайжон ва бошқа мамлакатларда нефть ва газлар ностационар фильтрацияси жараёнларининг математик моделлари, ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш ва дастурий таъминотини яратиш муҳим аҳамият касб этмоқда.

Жаҳонда ғовак муҳитда нефть ва газлар фильтрацияси жараёнларининг математик моделини яратиш, нефть ва газ конларининг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш алгоритмларини ва дастурий таъминот тизимларини ишлаб чиқиш, нефть ва газ конлари геологик ва гидродинамик объектларининг 3D моделини яратиш, фильтрация жараёнларини тадқиқ қилиш учун ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш ҳамда олинган натижаларни тадқиқ этишга йўналтирилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу йўналишда, жумладан кўп қатламли ғовак муҳитларда нефть ва газлар ҳаракатланишининг мураккаб жараёнларини тадқиқ қилиш ва реал объектларни аниқлашнинг математик моделларини қуриш, ҳисоблаш алгоритмини ишлаб чиқиш ва автоматлаштирилган тизимларни яратиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Шу билан бирга мураккаб конфигурацияли фильтрация соҳаси учун чизиқсиз масалаларни ечишнинг сонли ва аналитик усуллари ҳамда самарали алгоритмларини ишлаб чиқиш зарур ҳисобланмоқда.

Республикамизда ҳам нефть ва газ конларининг ишлаш жараёнларини лойиҳалаш, бир жинсли бўлмаган суюқликлар ностационар фильтрация жараёнларининг математик модели, чизиқсиз газ ва гидродинамик жараёнларни тадқиқ қилиш алгоритмларини ишлаб чиқиш, замонавий компьютер технологияларидан фойдаланиб асосий кўрсаткичларни ҳисоблаш жараёнларини баҳолаш, ҳамда автоматлаштирилган дастурий таъминотларни яратиш бўйича кенг қамровли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... иқтисодиёт, ижтимоий соҳага, бошқариш тизимига инфор­мацион-коммуникацион технологияларни жорий этиш, ... ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий этиш»¹ вазифалари белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга

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

оширишда лойиҳалаш жараёни учун ғовак муҳитларда бир жинсли бўлмаган суюқлик ва газларнинг ностационар фильтрацияси жараёнларининг умумлашган математик моделлари, сонли моделлари, самарали ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш ва замонавий ахборот технологиялари асосида автоматлаштирилган тизимлар яратиш муҳим масалалардан ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 30 июндаги ПҚ-3107-сон «Нефть-газ соҳасининг бошқарув тизимини такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2016 йил 28 сентябрдаги ПҚ-2614-сон «2016-2020 йилларда углеводород хом ашёсини чуқур қайта ишлаш негизида экспортга йўналтирилган тайёр маҳсулотлар ишлаб чиқаришни кўпайтириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларга мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи². Ғовак муҳитларда суюқликлар фильтрация масалаларини ечиш учун математик моделлар, самарали алгоритмлар ва дастурий таъминотларни ишлаб чиқишга йўналтирилган илмий изланишлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасалари, жумладан Mineral Engineering at the Pennsylvania State University, University of Texas at Austin, Missouri University of Science and Technology (АҚШ), Robert Gordon University (Буюк Британия), Institut Français du Pétrole (Франция), Polytechnic University of Turin (Италия), Technical University of Denmark (Дания), East China University of Science and Technology (Хитой), University of Petroleum & Energy Studies Dehradun (Ҳиндистон), Petroleum Institute Abu Dhabi (БАА), И.М.Губкин номидаги Россия Давлат нефть ва газ университети (Россия Федерацияси), Озарбайжон Давлат университети (Озарбайжон), Қозоғистон-Британия техника университети (Қозоғистон), Тошкент ахборот технологиялари университети (Ўзбекистон)да кенг қамровли илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Нефть-газ конларида суюқлик ва газларнинг ностационар фильтрация жараёнларини моделлаштириш, бир жинсли бўлмаган фильтрация масалаларини сонли моделлари ва ғовак муҳитларда суюқликлар фильтрацияси масалаларини ечишга қаратилган ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқишга оид жаҳонда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор,

² Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи Department of Physics, University of California, Berkly, California 94720, USA, Department of Aerospace Engineering, Department of Energy Engineering and Science, Nagoya University Nagoya, Japan ва бошқа манбалар асосида фойдаланилган.

жумладан куйидаги илмий натижалар олинган: қатламлар орасидаги динамик алоқага эга ғовак муҳитда суюқлик ва газлар ностационар филтрацияси жараёнлари учун математик моделлар ишлаб чиқилган (University of Pittsburgh, АҚШ); ўрганилаётган объект параметрларининг тақрибий тақсимотини ҳисобга олган ҳолда нефть ва газ конларини ўзлаштириш бўйича математик моделлар яратилган (Robert Gordon University, Буюк Британия); бир жинсли бўлмаган суюқликлар ҳаракати билан боғлиқ бўлган технологик жараёнларни бошқариш ва мониторинги учун математик моделлар, ҳамда сув ҳайдаш йўли орқали қовушқоқлиги юқори бўлган нефть сиқиб чиқаришнинг сонли моделлари ишлаб чиқилган (В.Г.Тимирязов номидаги Қозон инновация университети, Кубан Давлат технология университети, Россия Федерацияси).

Дунёда нефть ва газ конлари ишлашида қатлам самарадорлигини оширишга доир қатор, жумладан куйидаги устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда: нефть қазиб олишни ошириш жараёнларининг математик модели, сонли усуллари ва самарали алгоритмларини ишлаб чиқиш; нефть қатламларига сув ҳайдаш орқали қатлам босимини сунъий сақлаш усуллари ишлаб чиқиш; асосий кўрсаткичлар бўйича башоратлаш ва заҳирадаги нефтларни аниқлашнинг математик моделларини ишлаб чиқиш; нефть ва газ қазиб олишни мониторинг қилувчи ахборот тизимларни яратиш; нефть ва газ конлари ишлашининг иқтисодий самарадорлигини оширувчи дастурий таъминот яратиш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Сув қатламларида нефть ва газ филтрацияси мураккаб динамик жараёнларининг математик моделларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш, шунингдек уларни ечишнинг сонли усуллари, ёмон ўтказувчан қатламга эга нефть ва газ қатламларида стационар ва ностационар филтрация масалаларини ечиш М.Sharma, Х.Азиз, Э.Сеттари, N.B. Lopuh, С.Аtkinson, К.Ives, Z.Mehdi, P.J.Monteiro, S.Banerjee, G.I.Barenblatt, M.Chraibi, D.B.Silin, F.Boyer, C.Lapuerta, S.Minjeaud, А.Дарси, Л.С.Лейбензон, А.Х.Мирзаджанзаде, М.М.Хасанов, Б.Б.Лапук, К.С.Басниев, С.Н.Закиров, Д.Ж.Ахмед-Заки, А.В.Ахметзянов, А.Никифоров, А.В.Цепаев ва бошқа олимларнинг ишларида кўриб чиқилган.

Ўзбекистон Республикасида ғовак муҳитларда кўп фазали суюқлик ва газларнинг ностационар филтрацияси жараёнларининг математик моделлари ва ҳисоблаш усуллари Ф.Б.Абуталиев, Ж.Ф.Файзуллаев Н.М.Муҳидинов, Р.Садуллаев, А.Бегматов, Б.Х.Хўжаёров, М.Арипов, И.Алимов, Н.Равшанов, У.С.Назаров, Ш.Каюмов, Я.Ярбеков, А.Мирзаев ва бошқа олимларнинг тадқиқот ишларида ўрганилган. Модулли принципга асосланган айрим чегаравий масалаларни ечишни автоматлаштириш муаммолари В.Қ.Қобулов, Ф.Б.Абуталиев, А.Неъматов, В.Ф.Бурнашев ва бошқа олимлар ишларида келтириб ўтилган.

Соҳага оид тадқиқотлар таҳлили шуни кўрсатадики, ғовак муҳитда майда зарраларнинг чўкишини ҳисобга олувчи газ ва суюқликларнинг ностационар филтрацияси жараёнлари, мураккаб конфигурацияли

филтрация соҳалари, ёмон ўтказувчан қатламга эга динамик алоқали кўп қатламли ғовак муҳитларда газ ва суюқликлар ностационар ҳаракатланиши жараёнлари ҳозирги кунда етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент ахборот технологиялари ва унинг ҳузуридаги Ахборот-коммуникация технологиялари илмий-инновацион марказининг илмий тадқиқот ишлари режасининг №Ф4-ФА-Ф005 - «Мураккаб конфигурацияли математик физиканинг кўп ўлчамли синфлари нозизиқли масалаларини ечишнинг алгоритмик усулларни ишлаб чиқиш ва тадқиқ қилиш» (2012-2016) ва №А5-019 - «Ғовак муҳитларни қуритиш ва сақлаш жараёнларининг иссиқлик ва масса алмашинуви масалаларининг ахборот ва дастурий таъминотини ишлаб чиқиш» (2015-2017) мавзуларидаги лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кўп қатламли нефть ва газ конларининг асосий кўрсаткичларини аниқлаш учун математик моделлар, самарали ҳисоблаш алгоритмлари ва уларнинг комплекс дастурий таъминотини яратишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

нефть ва газ қатламларининг тузилишини ҳисобга оладиган ва бир жинсли бўлмаган ностационар филтрация жараёнларининг математик моделларини қуришда фойдаланиладиган ахборот моделларини шакллантириш;

мураккаб конфигурацияли филтрация соҳаларида ва ғовак муҳитда майда зарраларнинг чўкишини ҳисобга олувчи суюқлик ва газ ностационар филтрацияси жараёнларининг математик моделлари ва ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

қатлам босимини сунъий сақлаб туриш учун силжувчи нефть-сув ва газ-сув чегарали ностационар филтрация жараёнларининг математик моделларини такомиллаштириш;

нефть-сув ва газ-сув соҳаларини ажратувчи чегаранинг ҳаракати ҳамда филтрация масалаларини ечишнинг самарали алгоритмларини ишлаб чиқиш;

кўп қатламли ғовак муҳитларда суюқликлар филтрацияси масаласининг математик модели ва уларнинг тақрибий-аналитик ечиш усулини ишлаб чиқиш;

ўзаро динамик алоқага ўтказувчан қатлам орқали эга икки қатламли ғовак муҳитларда нефть ва газ филтрацияси масалаларининг сонли моделларини ишлаб чиқиш;

ёмон ўтказувчан қатламга эга кўп қатламли нефть ва газ конлари ишлаши асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

бир ва кўп қатламли нефть ва газ конлари ишлаши асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш ва тадқиқот натижаларини визуализация қилиш учун дастурий мажмуани ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти сифатида бир ва кўп қатламли ғовак муҳитларда суюқлик ва газларнинг ностационар фильтрацияси жараёнлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети ғовак муҳитларда газ ва суюқликларнинг ностационар фильтрация жараёнларини тадқиқ қилиш учун математик моделлар, сонли усуллар ва алгоритмлар, ҳамда муаммога йўналтирилган дастурий таъминотлари ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида ҳисоблаш математикаси, математик, компьютер моделлаштириш ва ҳисоблаш тажрибалари усуллари ҳамда дастурий тизимни ишлаб чиқишда дастурлаш технологияси усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

мураккаб конфигурацияли фильтрация соҳаларида майда зарраларнинг ғовак муҳитда чўкишини ҳисобга олган ҳолда суюқликлар ва газлар ностационар фильтрацияси жараёнларининг математик моделлари ва ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

суюқлик ва газ ҳаракати назариясига асосан босимни сунъий сақлаб туришда нефть-сув ва газ-сув силжувчи чегарасини ҳисобга олувчи ностационар фильтрация жараёнларининг математик моделлари нефть ва газ қатламли муҳитга сув ҳайдаш орқали такомиллаштирилган;

дифференциал-айирмалар ва ўзгарувчан йўналишлар усулидан фойдаланиб нефть-сув ва газ-сув биргаликдаги фильтрациясининг Стефан типигаги масалаларини ечиш учун самарали ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

дифференциал-айирмалар ва тўғри чизиклар усулларини биргаликда қўллаб кўп қатламли ғовак муҳитда суюқликлар фильтрацияси уч ўлчовли масаласини мос бошланғич, чегаравий ва ички шартларда тақрибий-аналитик ечиш усули ишлаб чиқилди;

газ ва суюқликлар ҳаракатининг қонунлари асосида ёмон ўтказувчан қатлам орқали динамик алоқага эга икки қатламли ғовак муҳитда нефть ва газ фильтрацияси масалаларининг сонли моделлари ишлаб чиқилган;

ёмон ўтказувчан қатламга эга икки қатламли ғовак муҳитда суюқликлар ва газ фильтрацияси масалаларининг сонли моделлари асосида суюқликлар ва газ конлари ишлашида асосий кўрсаткичларини аниқлаш учун ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

нефть ва газ конлари ишлаши жараёнида майда зарраларнинг ғовак муҳитда қўнишини ҳисобга олувчи асосий кўрсаткичларни ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминоти яратилган;

қатлам босими паст бўлган нефть ва газ конларида сув ҳайдаш билан босимни оширишни ҳисобга олувчи математик модел асосида асосий кўрсаткичларни ҳисоблаш учун самарали ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган;

ўзаро динамик алоқадаги ғовак муҳитларда нефть ва газ фильтрацияси жараёнларининг сонли ва компьютерли моделлари ишлаб чиқилган;

ёмон ўтказувчан қатламга эга ўзаро динамик алоқадаги нефть ва газ конлари ишлашида асосий кўрсаткичларини аниқлаш учун самарали ҳисоблаш алгоритмлари ва уларга мос натижаларни визуаллаштирувчи дастурий таъминот яратилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончилиги фойдаланилган математик моделларнинг қатъийлиги, уларнинг масса ва импульс сақланиш қонунлари асосида қурилганлиги, ҳисоблаш математикасининг синовдан ўтган усулларининг қўлланилиши, жумладан, сонли усулларни қўллаш орқали зарурий аниқлик ҳисобга олинган ҳолда уларнинг турғунлиги текширилганлиги, реал физик жараёнларга мослиги ҳамда олинган натижаларнинг сифат ва миқдор жиҳатдан баҳоланганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти ғовак муҳитларда зарраларнинг чўкиши ҳисобига вақт бўйича муҳит ғоваклигининг ўзгариши, сув ҳайдаш орқали нефть-сув ва газ-сув чегарасининг ўзгариши, ғовак муҳит структураси, гидродинамик ва геологик кўрсаткичлари билан фарқланадиган қатламлар, ҳамда ўзгарувчан йўналишлар, чекли-айирмалар ва дифференциал-айирмалар усулларининг авфзаллигидан фойдаланган ҳолда фильтрация жараёнларининг такомиллаштирилган математик моделлари, икки ва уч ўлчовли фильтрация масалаларини ечишнинг аниқ ва самарали алгоритмларини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти нефть ва газ конларини ишлаб чиқишнинг асосий кўрсаткичларини кунлик ва йиллик ўзгаришини таҳлил қилиш ва башоратлаш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилгани, шунингдек суюқлик ва газ фильтрацияси мураккаб ностационар жараёнларининг математик моделларини, икки ва уч ўлчовли фильтрация масалаларини ечишнинг самарали ҳисоблаш алгоритмларини амалиётга тадбиқи билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Қатламларнинг гидродинамик параметрлари орасидаги динамик муносабатларни ҳисобга олган ҳолда нефть ва газ конлари ишлашининг асосий кўрсаткичларини аниқлашнинг математик моделлари, ҳисоблаш алгоритмлари ва яратилган дастурий мажмуаси асосида:

нефть-газ конлари асосий кўрсаткичларини аниқлаш моделлари ва алгоритмлари бўйича «Газ конларини ишлаб чиқишнинг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш», «Ғовак муҳитларда нефтнинг филтрланиш жараёнларини математик моделининг дастурий таъминоти», «Динамик боғланган икки қатламли муҳитда газ конларини қайта ишлашининг асосий кўрсаткичларини ҳисобловчи дастурий мажмуани ишлаб чиқиш», «Икки қатламли муҳитда нефть филтрланиш масаласини сонли ечимининг дастурий мажмуи» дастурий воситаларидан «UNICON.UZ» ДУК томонидан фойдаланиш мумкинлиги тўғрисида хулоса берилган («UNICON.UZ» ДУКнинг 2018 йил 17 декабрдаги хулосаси). Натижада ғовак муҳитларда

майда зарраларнинг чўкиб қолиши, қатламга сув ҳайдаш орқали босимни сунъий кўтариш, ёмон ўтказувчан қатламга эга кўп қатламли муҳитларда босимнинг вақт бўйича ўзгаришини аниқлаш имконини берган;

икки ўлчовли ғовак муҳитларда суюқлик ва газларнинг ностандарт фильтрацияси жараёнлари учун ишлаб чиқилган математик модел, сонли усул, ҳисоблаш алгоритми ва дастурлар мажмуи «Муборакнефтваз» МЧЖнинг амалий фаолиятига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 8 ноябрдаги 33-8/8368-сон маълумотномаси). Натижада тажриба жараёнида олинган натижалар билан солиштириш яқинлиги 15%ни ташкил этган, шунингдек ҳисоблашга кетадиган вақтни 8–10 баробар қисқартириш имконини берган;

ғовак муҳитларда суюқликлар ностационар фильтрацияси масалаларини сонли ечиш алгоритмлари асосида яратилган дастурий таъминот «Джарқурганнефть» акциядорлик компанияси томонидан Сурхандарё вилоятидаги нефть ва газ конлар амалиётига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 8 ноябрдаги 33-8/8368-сон маълумотномаси). Натижада сув ҳайдаш орқали нефтли қатламлар самарадорлигини 10%га ошириш имконини берган;

нефть ва газ конлари ишлашининг асосий кўрсаткичларини аниқлаш бўйича олинган натижалар «Қасансой нефтваз разведка экспедицияси» МЧЖ амалиётига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 8 ноябрдаги 33-8/8368-сон маълумотномаси). Натижада икки қатламли нефть конлари ишлаши асосий кўрсаткичларини таҳлил қилиш ва башоратлаш ҳамда қатлам маҳсулдорлигини 8–10%га ошириш имконини берган;

икки қатламли ғовак муҳитларда газ фильтрацияси жараёнларининг сонли моделлари «Шўртаннефтваз» МЧЖ амалиётига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 8 ноябрдаги 33-8/8368-сон маълумотномаси). Натижада кўп қатламли ғовак муҳитларда газ фильтрацияси жараёнини ҳисоблашни автоматлаштириш ва ҳисоблаш ишларининг тезкорлиги ҳисобига қатлам маҳсулдорлиги 8–10%га оширилган ва қудуқларга сарфни 8%гача қисқартириш имконини берган;

кучли ифлосланган нефтнинг ностационар фильтрацияси жараёнларининг математик модели, сонли алгоритмлари «ГИДРОИНГЕО институти» давлат корхонасида ишлаб чиқариш амалиётига жорий қилинган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2018 йил 8 ноябрдаги 33-8/8368-сон маълумотномаси). Натижада нефть ва газ конларидаги қатлам самарадорлигини 9–10%га ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 9 та халқаро ва 15 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Тадқиқот мавзуси бўйича 37 илмий иш чоп этилган, жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий натижаларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 11 та мақола, 9 таси республика ва 2 таси хорижий журналларда нашр қилинган, ЭҲМ учун яратилган 5 та дастурий таъминотларни қайд қилиш гувоҳномаси олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация иши кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 197 саҳифани ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект 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 очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, ишнинг апробацияси, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг биринчи **«Ғовак муҳитда нефть ва газнинг ностационар фильтрацияси жараёнини тадқиқ қилишнинг мақсади, вазифалари ва муаммо ҳолати»** бобида ғовак муҳитда нефть ва газнинг ностационар фильтрацияси жараёнини математик моделлаштириш бўйича адабиёт манбалари шарҳи ва таҳлили келтирилган. Кўп қатламли ғовак муҳитда фильтрация жараёнларини математик моделлаштиришнинг ҳозирги ҳолати қараб чиқилган ва унинг ривожланиш тенденцияси ўрганилган. Ғовак муҳитда нефть ва газнинг ностационар фильтрацияси жараёнини математик моделлаштириш учун инфор­мацион таъминот масаласи кўриб чиқилган.

Информацион модел асосида масаланинг қўйилишини тўғри шакллантириш, ҳисоблар ўтказиш, объект функционал­лигини таҳлил қилиш, маълум бўлган ва янги қонуниятларни кўрсатиш, ҳамда мураккаб объектнинг структураси ва тузилиши очилмаган омилларини ва бошқаларни ҳисобга олишга имкон берадиган илмий гипотезалар тўпламини тушуниш мумкин. Объектнинг инфор­мацион моделини куриш учун мақсадга йўналтирилганлик, акс эттиришнинг тўлиқлиги, адекватлик, мослашувчанлик, модуллилик, фойдаланишда соддалик, стандартлаш ва унификация, мувофиқлик ва узлуксизлик принцип­ларидан фойдаланиш лозим.

Нефть ва газ конларининг асосий кўрсаткичларини аниқлашда инфор­мацион моделларни куриш нефть ва газни кўп қатламли муҳитда фильтрация масалаларини тўғри акслантирувчи математик моделни ишлаб чиқиш ва ЭҲМда объект асосий кўрсаткичларини аниқлаш имконини беради.

Диссертациянинг иккинчи **«Ғовак муҳитда нефть ва газ фильтрацияси масаласининг математик модели ва сонли ечиш**

алгоритми» бобида нефть ва газнинг фильтрацияси жараёнида ғовак муҳитда майда зарраларнинг чўкиб қолишини ҳисобга олувчи математик моделлар, шу моделлар асосида шакллантирилган масалаларни ечишнинг сонли усуллари, ечиш алгоритмлари таклиф этилган ва олинган сонли натижалар муҳокама этилган.

Биринчи параграфда кичик дисперсияли заррачаларнинг ғовакликда чўкиб қолиши ҳисобга олинган ҳолда нефтнинг бир жинсли бўлмаган икки ўлчовли ихтиёрий ғовак соҳада ностационар филтрланишнинг математик модели ва масалани сонли ечишнинг ўзгарувчан йўналишлар усули асосида қурилган усули келтирилган. Чегаравий масала қуйидагича шакллантирилди:

$$\left\{ \begin{aligned} \beta h(x, y) \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - Q, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\eta}{dt} = \lambda(\theta_0 - \gamma\eta), \quad \text{агар } (x, y) \in G \text{ бўлса;} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} P(x, y) = P_H, \quad \eta(t) = \eta_0 \quad t = 0 \text{ бўлганда,} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} - \frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_A - P), \quad (x, y) \in \Gamma \text{ учун,} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \oint_{s_{i_q}} \frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t), \quad (x, y) \in s_{i_q} \text{ ва } i_q = \overline{1, N_q} \text{ учун,} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} m = m_1 + \eta(m_0 - m_1), \quad k = k_0(1 - \sqrt{\eta})^3, \quad \beta = m\beta_H + \beta_c, \quad Q = \sum_{i,j=1}^N \delta_{i,j} q_{i,j}. \end{aligned} \right.$$

Бу ерда P – қатламдаги босим; P_H – бошланғич босим; P_A – чегарадаги босим; μ – нефть қовушқоқлиги; k – қатлам ўтказувчанлик коэффиценти; k_0 – қатлам бошланғич ўтказувчанлиги коэффиценти; h – қатлам қуввати; β – эластиклик коэффиценти; β_H – нефтнинг сиқилиш коэффиценти; β_c – қатламнинг сиқилиш коэффиценти; m – ғоваклик коэффиценти; m_0 – бошланғич ғоваклик; m_1 – чўкиб қолаётган масса ғоваклиги; q_{i_q} – i_q – чи қудуқ дебити; s_{i_q} – i_q – чи қудуқ контури; n – Γ чегарага ички нормаль; N_q – қудуқлар сони; η – ғовак муҳитда зарралари чўкиши тезлиги; γ – фильтрация параметри; λ – чўкувчи массанинг кинематик коэффиценти.

(1)-(2) масалани чекли айирмалар усулида ечиш учун қуйидаги ўлчамсиз ўзгарувчиларни киритамиз:

$$\begin{aligned} P^* &= P/P_0, \quad x^* = x/L, \quad y^* = y/L, \quad k^* = k/k_0, \quad h^* = h/h_0, \\ \eta^* &= \eta/\eta_0, \quad \tau = \frac{k_0 t}{\beta \mu L^2}, \quad q^* = \frac{q \mu}{\pi k_0 P_0 h_0}, \quad \lambda^* = \frac{k_0 \lambda}{\beta \mu \eta_0 L^2}, \quad \alpha^* = \frac{\mu L}{k_0 h_0}. \end{aligned}$$

Қулайлик учун юлдузча белгисини ташлаб юбориб, ўлчамсиз ўзгарувчиларга нисбатан (1)-(2) масалани қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\left\{ \begin{array}{l}
h \frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - Q, \\
\frac{d\eta}{d\tau} = \lambda(\theta_0 - \gamma\eta), \quad (x,y) \in G \text{ учун}, \\
P(x,y) = P_H, \quad \eta(t) = \eta_0, \quad t=0 \text{ бўлганда}, \\
-k(x,y)h(x,y) \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_A - P) \quad (x,y) \in \Gamma \text{ учун}, \\
\oint_{S_q} k(x,y)h(x,y) \frac{\partial P}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t), \quad (x,y) \in s_{i_q}, \quad i_q = 1, 2, \dots \text{ учун}, \\
m = m_1 + \eta(m_0 - m_1), \quad k = k_0(1 - \sqrt{\eta})^3.
\end{array} \right. \quad (3)$$

Масалани ечиш учун ўзгарувчан йўналишлар схемасининг алгоритмик ғоясидан фойдаланилди. Бунда r - вақт қатлаидан $r+1$ - вақт қатламига ўтиш икки босқичда $0.5\Delta\tau$ қадам билан амалга оширилади. Олинган чекли-айирмали тенгламалар тизимини ечишда прогонка усули қўлланилади.

Ғовак муҳитда заррачаларнинг чўкиш тезлиги η ни топиш учун (1) тенгламалар тизимининг иккинчи тенгламасини τ бўйича аппроксимация қилиб, қуйидаги формулага эга бўламиз

$$\eta_{i,j} = \frac{\lambda\Delta\tau\theta_0 + \hat{\eta}_{i,j}}{1 + \gamma\lambda\Delta\tau},$$

бу ерда $\hat{\eta}_{i,j}$ - олдинги вақт қатлаидан олинган $\eta_{i,j}$ нинг қиймати, унинг бошланғич қиймати (3) бошланғич шартдан олинади.

Топилган $\eta_{i,j}$ қиймати ҳар бир вақт қатламида ғоваклик m ва қатлам ўтказувчанлиги k коэффициентларини аниқлашда фойдаланилади.

Кичик дисперсияли заррачаларнинг ғовакда тутилиб қолишини ҳисобга олганда ғовак муҳитда газнинг ностационар фильтрацияси жараёнининг математик модели қуйидаги бошланғич ва чегаравий шартлар билан чизиксиз параболик типдаги дифференциал тенглама кўринишида ёзилди:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P^2}{\partial y} \right) = 2amh(x,y) \frac{\partial P}{\partial t} - Q, \quad (x,y) \in G, \\
P(x,y) = P_H(x,y), \quad t=0, \quad (x,y) \in G, \\
-\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P(x,y,t)}{\partial n} = \alpha(P_A - P); \quad (x,y) \in \Gamma, \\
\oint_{S_q} \frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{P}{P_{am}} \frac{\partial P}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t), \quad (x,y) \in s_{i_q}, \quad i_q = 1, 2, \dots
\end{array} \right. \quad (4)$$

(4) чегаравий масалани сонли усулда ечиш учун юқоридаги каби ўлчамсиз масалага келтирилади. Ўлчамсиз масалага ўзгарувчан йўналишлар схемасини қўллаб, $r+0.5$ - вақт оралиқ қатлами учун ички тугунларда қуйидаги чекли-айирмали тенгламага эга бўламиз:

$$\frac{\bar{P}_{i,j} - \hat{P}_{i,j}}{\Delta\tau/2} = \frac{T_{i-0.5,j}\bar{P}_{i-1,j}^2 - (T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j})\bar{P}_{i,j}^2 + T_{i+0.5,j}\bar{P}_{i+1,j}^2}{\Delta h_x^2} +$$

$$+ \frac{T_{i,j-0.5}\hat{P}_{i,j-1}^2 - (T_{i,j-0.5} + T_{i,j+0.5})\hat{P}_{i,j}^2 + T_{i,j+0.5}\hat{P}_{i,j+1}^2}{\Delta h_y^2} - \delta_{i,j}q_{i,j}.$$

Олинган чекли-айирмали тенглама P босим функциясига нисбатан чизиксиз бўлгани туфайли, уни ечишда квазилинеаризация ва итерация усуллари қўлланилади. У ҳолда, бу чекли-айирмали тенгламани квазичизикли айирмали тенглама кўринишида қуйидагича ёзиш мумкин

$$\frac{2}{\Delta h_x^2} T_{i-0.5,j} \tilde{P}_{i-1,j} \bar{P}_{i-1,j} - \left[\frac{2}{\Delta h_x^2} (T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j}) \tilde{P}_{ij} + \frac{1}{\Delta\tau/2} \right] \bar{P}_{ij} + \frac{2}{\Delta h_x^2} T_{i+0.5,j} \tilde{P}_{i+1,j} \bar{P}_{i+1,j} = \frac{1}{\Delta h_x^2} \left[T_{i-0.5,j} \tilde{P}_{i-1,j}^2 - \right.$$

$$\left. - (T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j}) \tilde{P}_{ij}^2 + T_{i+0.5,j} \tilde{P}_{i+1,j}^2 \right] - \frac{1}{\Delta h_y^2} \left[T_{ij-0.5} \hat{P}_{ij-1}^2 - (T_{ij-0.5} + T_{ij+0.5}) \hat{P}_{ij}^2 + T_{ij+0.5} \hat{P}_{ij+1}^2 \right] - \frac{1}{\Delta\tau/2} \hat{P}_{ij} - \delta_{i,j} q_{i,j}.$$

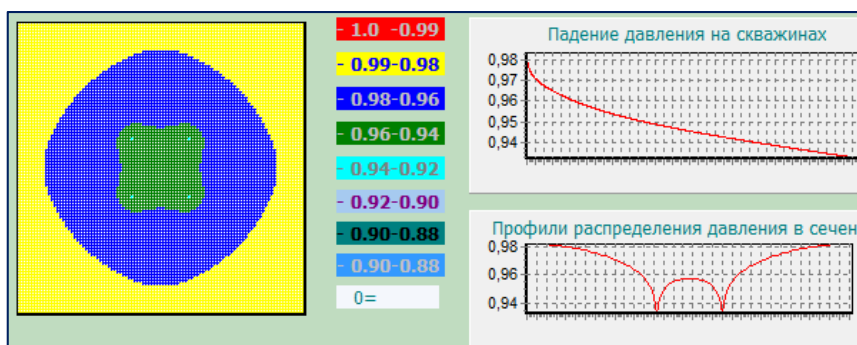
Бу ерда $\bar{P}_{i-1,j}, \bar{P}_{i,j}, \bar{P}_{i+1,j}$ - вақт қатламидаги босим функциялари қийматлари; $\tilde{P}_{i-1,j}, \tilde{P}_{i,j}, \tilde{P}_{i+1,j}$ - босим функцияларининг бошланғич итерация қийматлари; $\hat{P}_{i,j-1}, \hat{P}_{i,j}, \hat{P}_{i,j+1}$ - r - вақт қатламидаги босим функциялари қийматлари;

$$T_{i-0.5,j} = \frac{k_{i-0.5,j} h_{i-0.5,j}}{\mu}, \quad T_{i+0.5,j} = \frac{k_{i+0.5,j} h_{i+0.5,j}}{\mu}, \quad T_{i,j-0.5} = \frac{k_{i,j-0.5} h_{i,j-0.5}}{\mu},$$

$$T_{i,j+0.5} = \frac{k_{i,j+0.5} h_{i,j+0.5}}{\mu}.$$

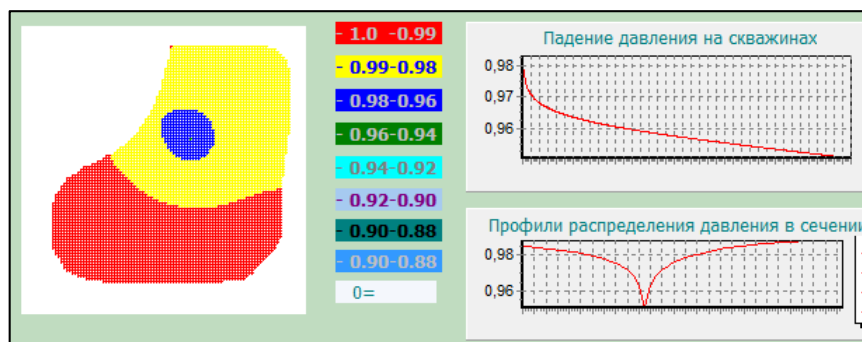
Чекли айирмали тенгламалар мос чегаравий ва ички шартлар учун оддий прогонка усулида ечилади. Худди шу тарзда у йўналишда тенглама ва шартлар $r+0.5$ -вақт қатлами учун аппроксимацияланади. Итерация жараёни $\max |P_{i,j}^{(s)} - P_{i,j}^{(s-1)}| \leq \varepsilon$ шарт бажарилгунча давом этади. Бу ерда ε - итерация жараёни аниқлиги; s - итерациялар сони.

Ишлаб чиқилган сонли модел асосида ҳисоблаш алгоритми ва дастури яратилган бўлиб, унинг ёрдамида компьютерда ғовак муҳитда нефть ва газнинг фильтрацияси жараёнини тадқиқ қилиш учун қатор ҳисоблаш тажрибалари ўтказилган (1-6 - расмлар).



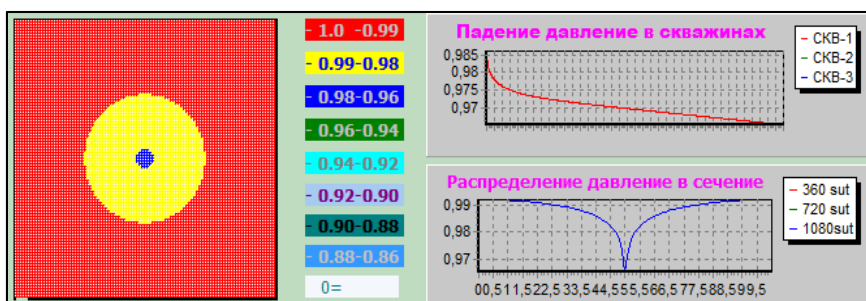
1-расм. Квадрат фильтрация соҳаси учун ҳисоб натижаси

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 200 \text{ м}^3 / \text{сутка}$$



2-расм. Ихтиёрй фильтрация соҳаси учун ҳисоб натижаси
 $q_1 = 200 \text{ м}^3 / \text{сутка}$

1-ва 2-расмларда турли хил конфигурацияли нефть конлари учун ҳисоблаш натижалари келтирилган. Олинган натижаларни жадвал, контурли график кўринишда, қатлам кесимида ва қудуқларда босимнинг тушиши графиклари кўринишида тақдим этиш мумкин.



3-расм. Майда зарраларнинг ғовакликда чўкиб қолиши ҳисобига босимнинг ўзгариши



4-расм. Майда зарраларсиз қатламда босим ўзгариши

3-4-расмлардан кўриниб турибдики, дастлаб қудуқларда босимнинг тез тушиши кузатилмоқда, кейинчалик эса тушиши стабиллашмоқда, яъни секинлашмоқда. Зарраларнинг чўкиши вақт ўтиши билан қудуқда босимнинг жадал тушишига олиб келади.

Диссертациянинг учинчи «Ғовак муҳитда аралашмайдиган суюқликларнинг биргаликдаги фильтрация жараёнларини сонли моделлаштириш» бобида ғовак муҳитга сув ҳайдаш ёрдамида нефть ёки газни сиқиб бориш жараёнини математик моделлаштириш ва дифференциал-айирмалар схемаси ғоясига асосланган дифференциал прогонка усулида сонли ечишнинг алгоритмини ишлаб чиқиш муаммолари қаралган.

Математик жиҳатдан бундай жараёнлар фазаларнинг силжувчи чегарали масаласи каби шакллантирилади ва қуйидаги чегаравий масала кўринишида ёзилади:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial y} \right) = a \beta_H \frac{\partial P_1}{\partial t} - Q \quad (x, y) \in G_1 \text{ бўлганда,} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial y} \right) = (1 - a_0) \beta_B \frac{\partial P_2}{\partial t} + Q \quad (x, y) \in G_2 \text{ бўлганда,} \\ P_1 = P_2 = P_H(x, y) \quad t = 0 \text{ ва } (x, y) \in G_1 + G_2 \text{ бўлганда,} \\ q_{H_{i_q}}(t) = \oint_{s_{i_q}} \frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial n} ds, \quad i_q = \overline{1, N_q}, \quad q_{B_{i_q}}(t) = \oint_{s_{i_q}} \frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial n} ds, \quad (x, y) \in s_{i_q}, \quad i_q = \overline{1, M_q}, \\ \frac{\partial P_2}{\partial n} = 0 \quad (x, y) \in \Gamma_2 \text{ учун, } P_1(x, y) = P_2(x, y), \quad \frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial n} = \frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial n} \quad (x, y) \in \Gamma_1 \text{ бўлганда,} \\ \frac{\partial l(x, y, t)}{\partial t} = - \frac{k}{\mu_1 m(a - a_0)} \frac{\partial P_1(x, y, t)}{\partial l}, \quad l(x, y, 0) = \phi(x, y) \quad (x, y) \in \Gamma_1 \text{ бўлганда.} \end{array} \right. \quad (5)$$

Бу ерда P_1, P_2 – босим, нефть ва сув зоналарида; β_n, β_s – нефть ва сувнинг ҳажмий эгилювчанлик коэффициентлари. ($\beta_n = m\beta_{нжс} + \beta_c$; $\beta_s = m\beta_{сжс} + \beta_c$); $\beta_{нжс}, \beta_{сжс}$ – нефть ва сувнинг ҳажмий сиқилувчанлик коэффициентлари; β_c – муҳит сиқилиш коэффициенти; Γ_1 – силжувчи чегара контури; Γ_2 – ташқи контур; s_{i_q} – i_q -чи кудук контури; $q_{H_{i_q}}$ – i_q -чи нефть кудуғи дебити; $q_{B_{i_q}}$ – i_q -чи сув кудуғи дебити; l – Γ_1 силжувчи чегара контури ички нормали йўналтирилишида тезлик вектори; a – нефтга тўйинганлик коэффициенти; a_0 – нефтнинг қолдиқ тўйинганлиги коэффициенти; ϕ – нефть-сув бўлинишининг бошланғич чегараси.

Чегаравий масала (5)-(6) дан ўлчамсиз ўзгарувчиларга ўтгандан сўнг, дифференциал-айирмалар масаласига келиш учун ошқормас ўзгарувчи йўналишлар усули қўлланилади. Бунга асосан r -чи вақт қатлаидан $r+1$ -қатламга ўтиш $0.5\Delta\tau$ қадам билан икки босқичда амалга оширилади. Биринчи босқичда қуйидаги дифференциал-айирмали тенгламаларни ечиш керак бўлади:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx} \left(k_{i,j} \frac{dP_{1j}^{(r+0.5)}(x)}{dx} \right) - \frac{1}{0.5\Delta\tau} P_{1j}^{(r+0.5)}(x) = - \frac{P_{1j}^{(r)}(x)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda_{1y} [k_{i,j} P_{1i,j}^{(r)}], \\ \frac{d}{dy} \left(k_{i,j} \frac{dP_{1i}^{(r+1)}(y)}{dy} \right) - \frac{1}{0.5\Delta\tau} P_{1i}^{(r+1)}(y) = - \frac{P_{1i}^{(r+0.5)}(y)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda_{1x} [k_{i,j} P_{1i,j}^{(r+0.5)}], \\ \frac{d}{dx} \left(k_{i,j} \frac{dP_{2j}^{(r+0.5)}(x)}{dx} \right) - \frac{R^*}{0.5\Delta\tau} P_{2j}^{(r+0.5)}(x) = - \frac{P_{2j}^{(r)}(x)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda_{2y} [k_{i,j} P_{2i,j}^{(r)}], \\ \frac{d}{dy} \left(k_{i,j} \frac{dP_{2i}^{(r+1)}(y)}{dy} \right) - \frac{R^*}{0.5\Delta\tau} P_{2i}^{(r+1)}(y) = - \frac{P_{2i}^{(r+0.5)}(y)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda_{2x} [k_{i,j} P_{2i,j}^{(r+0.5)}]; \end{array} \right. \quad (7)$$

бу ерда

$$\Lambda_{1y} \left[k_{i,j} P_{1i,j}^{(r)} \right] = \frac{k_{i-0.5,j} P_{1i-1,j}^{(r)} - (k_{i-0.5,j} + k_{i+0.5,j}) P_{1i,j}^{(r)} + k_{i+0.5,j} P_{1i+1,j}^{(r)}}{\Delta h^2},$$

$$\Lambda_{1x} \left[k_{i,j} P_{1i,j}^{(r+0.5)} \right] = \frac{k_{i,j-0.5} P_{1i,j-1}^{(r+0.5)} - (k_{i,j-0.5} + k_{i,j+0.5}) P_{1i,j}^{(r+0.5)} + k_{i,j+0.5} P_{1i,j+1}^{(r+0.5)}}{\Delta h^2},$$

$$\Lambda_{2y} \left[k_{i,j} P_{2i,j}^{(r)} \right] = \frac{k_{i-0.5,j} P_{2i-1,j}^{(r)} - (k_{i-0.5,j} + k_{i+0.5,j}) P_{2i,j}^{(r)} + k_{i+0.5,j} P_{2i+1,j}^{(r)}}{\Delta h^2},$$

$$\Lambda_{2x} \left[k_{i,j} P_{2i,j}^{(r+0.5)} \right] = \frac{k_{i,j-0.5} P_{2i,j-1}^{(r+0.5)} - (k_{i,j-0.5} + k_{i,j+0.5}) P_{2i,j}^{(r+0.5)} + k_{i,j+0.5} P_{2i,j+1}^{(r+0.5)}}{\Delta h^2}.$$

Дифференциал прогонка усулига асосан (7) дифференциал-айирмали тенгламалар тизими ечимлари куйидаги формулалардан аниқланади:

$$P_{1j}^{(r+0.5)}(x) = \frac{\gamma_j(x) u_j(x) - \alpha_j(x) w_j(x)}{\alpha_j(x) v_j(x) - \beta_j(x) u_j(x)}, \quad \frac{dP_{1j}^{(r+0.5)}(x)}{dx} = \frac{1}{k_{1j}(x)} \frac{v_j(x) \gamma_j(x) - w_j(x) \beta_j(x)}{[\alpha_j(x) v_j(x) - \beta_j(x) u_j(x)]},$$

$$P_{1j}^{(r+1)}(y) = \frac{\gamma_j(y) u_j(y) - \alpha_j(y) w_j(y)}{\alpha_j(y) v_j(y) - \beta_j(y) u_j(y)}, \quad \frac{dP_{1j}^{(r+1)}(y)}{dy} = \frac{1}{k_{1j}(y)} \frac{v_j(y) \gamma_j(y) - w_j(y) \beta_j(y)}{[\alpha_j(y) v_j(y) - \beta_j(y) u_j(y)]};$$

бу ерда $\alpha_j(x), \beta_j(x), \gamma_j(x)$ ва $u_j(x), v_j(x), w_j(x)$ мос равишда чап ва ўнг прогонка коэффициентлари куйидаги Коши масалаларини ечиш орқали топилади:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{1j}(x) \frac{du_j(x)}{dx} = v_j(x), \quad u_j(0) = 1; \\ \frac{dv_j(x)}{dx} = R_{1j} u_j(x), \quad v_j(0) = 0; \\ \frac{dw_j(x)}{dx} = F_{1j} u_j(x), \quad w_j(0) = 0; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} k_{1j}(x) \frac{d\alpha_j(x)}{dx} = \beta_j(x), \quad \alpha_j(1) = 1; \\ \frac{d\beta_j(x)}{dx} = R_{1j} \alpha_j(x), \quad \beta_j(1) = 0; \\ \frac{d\gamma_j(x)}{dx} = F_{1j} \alpha_j(x), \quad \gamma_j(1) = 0; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{1i}(y) \frac{du_i(y)}{dy} = v_i(y), \quad u_i(0) = 1; \\ \frac{dv_i(y)}{dy} = R_{1i} u_i(y), \quad v_i(0) = 0; \\ \frac{dw_i(y)}{dy} = F_{1i} u_i(y), \quad w_i(0) = 0; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} k_{1i}(y) \frac{d\alpha_i(y)}{dy} = \beta_i(y), \quad \alpha_i(1) = 1; \\ \frac{d\beta_i(y)}{dy} = R_{1i} \alpha_i(y), \quad \beta_i(1) = 0; \\ \frac{d\gamma_i(y)}{dy} = F_{1i} \alpha_i(y), \quad \gamma_i(1) = 0. \end{array} \right.$$

Бу ерда

$$F_{1j} = -\frac{P_{1j}^{(r)}(x)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda \left[k_{1i,j} P_{1i,j}^{(r)} \right] - \delta_{i,j} q_{i,j}, \quad F_{1i} = -\frac{P_{1i}^{(r+0.5)}(y)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda \left[k_{1i,j} P_{1i,j}^{(r+0.5)} \right], \quad R_{1j} = \frac{1}{0.5\Delta\tau}, \quad R_{1i} = \frac{1}{0.5\Delta\tau}.$$

Иккинчи тенглама учун ҳам $P_{2j}^{(r+0.5)}$ ва $P_{2i}^{(r+1)}$ ечим юкоридаги каби аниқланади.

Нефть-сув бўлиниш силжувчи чегара ҳолати куйидаги формула билан аниқланади: $l_{i,j} = \hat{l}_{i,j} - \frac{\Delta\tau k_{i,j}}{m\mu_1} \left[\frac{dP_1}{dx} \cos \bar{\alpha} + \frac{dP_1}{dy} \cos \bar{\beta} \right]$.

Бу ерда $l_{i,j}$ – бўлиниш чегарасида ички нормал бўйича йўналтирилган тезлик вектори $l_{i,j}^{(0)} = \hat{l}_{i,j} = l(x, y, t_0)$; $\bar{\alpha}$ – ox ўқи ва нормаль орасидаги бурчак; $\bar{\beta}$ – oy ўқи ва нормаль орасидаги бурчак: $\bar{\beta} = \frac{3}{2}\pi + \bar{\alpha}$.

Ҳовак муҳитда газ-сув силжувчи чегараси ностационар филтрация жараёнининг математик модели куйидаги кўринишда бўлди:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1^2}{\partial y} \right) = 2am \frac{\partial P_1}{\partial t} - Q, & (x, y) \in G_1, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2^2}{\partial y} \right) = (1-a_0) \beta_B \frac{\partial P_2}{\partial t} + Q, & (x, y) \in G_2, \\ P_1 = P_2 = \bar{P}(x, y), \quad t = 0, \quad (x, y) \in G_1 + G_2, \\ q_{\Gamma_{i_q}}(t) = \oint_{s_{i_q}} \frac{k}{\mu_1} \frac{P_1}{P_{ar}} \frac{\partial P_1}{\partial n} ds, \quad i_q = \overline{1, N_q}, \quad q_{B_{i_q}}(t) = \oint_{s_{i_q}} \frac{k}{\mu_2} \frac{P_2}{P_{ar}} \frac{\partial P_2}{\partial n} ds, \quad (x, y) \in s_{i_q}, \quad i_q = \overline{1, M_q}, \\ \frac{\partial P_2}{\partial n} = 0, \quad (x, y) \in \Gamma_2, \quad P_1(x, y) = P_2(x, y), \quad \frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial n} = \frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial n}, \quad (x, y) \in \Gamma_1, \\ \frac{\partial l}{\partial t} = -\frac{k_1}{\mu_1 m (a - a_0)} \frac{\partial P_1}{\partial l}; \quad l(x, y, 0) = \phi(x, y), \quad (x, y) \in \Gamma_1. \end{cases}$$

Математик моделнинг биринчи тенгласи босим функциясига нисбатан чизиқсиз бўлганлиги учун масалани ечишда II-бобдаги каби чизиқсиз ҳадлар квазилинеаризация қилинади ва итерация усулидан фойдаланилади.

Ҳовак муҳитда нефть-сув ва газ-сув биргаликдаги ностационар филтрацияси жараёни тадқиқи бўйича ҳисоблаш тажрибалари ўтказилган.

5-расмда тўртбурчак соҳа учун блокланган сув ҳайдаш йўли билан қатламнинг чап қисмидаги учта сув ҳайдаладиган қудуқлар ёрдамида қатламнинг бошланғич босими сунъий сақланади. Бунда ҳисоб соҳаси марказида битта ишлаётган нефть қудуғи жойлаштирилган.



5-расм. Блокланган сув ҳайдаш йўли билан қатламда босимни тушиб кетишидан сақлаш

Расмдан кўришиб турибдики, қатламнинг бошланғич босими ўнг томонда айрим интервалларда деярли бир хил, сўнгра ишлаётган қудуқ жойлашган нуқтада ўзининг минимал қийматларига эга бўлмоқда. Маълум вақт оралиғида қатламнинг ўнг қисмида босимнинг тушиб бориши

кузатилади (бу қисм графикда қора ранг билан белгиланган). Вақт ўтиши билан эса бу жараён меъёрлашади, яъни чап томонда босим ошиб бориши кузатилади.

Диссертациянинг тўртинчи «**Кўп қатламли ғовак муҳитда нефть ва газнинг фильтрация жараёнларини моделлаштириш**» бобида кўп қатламли ғовак муҳитда суюқликларнинг фильтрацияси жараёнининг математик модели ишлаб чиқилган ва масаланинг тақрибий-аналитик ечими олинган. Динамик алоқадаги икки қатламли ғовак муҳитда нефть ва газ фильтрацияси масалаларининг сонли моделлари ва ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Кўп қатламли суюқликлар фильтрацияси жараёнининг уч ўлчовли математик модели қуйидаги тенгламалар ва чегаравий шартлар билан ёзилади:

$$\begin{cases} \frac{1}{a_1} \frac{\partial P_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_1}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_1(z) \frac{\partial P_1}{\partial z} \right), \\ \frac{1}{a_2} \frac{\partial P_2}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_2}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_2(z) \frac{\partial P_2}{\partial z} \right) - \delta Q, \\ \frac{1}{a_3} \frac{\partial P_3}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_3}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_3(z) \frac{\partial P_3}{\partial z} \right); \\ \left\{ \begin{array}{l} P_s|_{t=0} = P_{0,s}(x, y, z), \quad P_s|_{x=0} = \varphi_{1,s}(y, z, t), \quad P_s|_{x=L_1} = \varphi_{2,s}(L_1, y, z, t), \quad P_s|_{y=0} = \psi_{1,s}(x, z, t), \\ P_s|_{y=L_2} = \psi_{2,s}(x, L_2, z, t), \quad P_s|_{z=0} = \zeta_{1,s}(x, y, t), \quad P_s|_{z=L_3} = \zeta_{2,s}(x, y, L_3, t). \end{array} \right. \end{cases}$$

Кўриниб турибдики, қатламлар орасидаги чегараларда қуйидаги уланиш шартлари бажарилиши керак:

$$P_s|_{z=m_{s+1}} = P_{s+1}|_{z=m_{s+1}}; \quad k_s \frac{\partial P_s}{\partial z} \Big|_{z=m_{s+1}} = k_{s+1} \frac{\partial P_{s+1}}{\partial z} \Big|_{z=m_{s+1}}.$$

Бу ерда $s=1,2,3$ – қатлам тартиб рақами; P_s – s -қатламдаги босим; $k(z)_s$ – s қатламдаги фильтрация коэффициенти; a_s – s – қатламдаги пьезоўтказувчанлик коэффициенти; $\varphi_{1,s}(y, z, t)$, $\varphi_{2,s}(L_1, y, z, t)$, $\psi_{1,s}(x, z, t)$, $\psi_{2,s}(x, L_2, z, t)$, $\zeta_{1,s}(x, y, t)$, $\zeta_{2,s}(x, y, L_3, t)$ – фильтрация соҳаси чегарасидаги берилган узлуксиз функциялар; m_{s+1} – қатлам бўлиниш нуқталари;

Q – кудуклардаги дебит, $Q = \sum_{i=1}^r \delta q_i(t)$.

Чекли-айирмалар ва дифференциал-айирмалар усуллари асосида кўп қатламли ғовак муҳитда суюқлик фильтрацияси жараёни масаласини ечишнинг тақрибий-аналитик ечими олинган.

Кўп қатламли нефть конларини ишлашини таҳлил қилишда қатламлар орасидаги гидродинамик алоқани ҳисобга олиш зарур. Агар қатламлар хусусиятларига кўра бир жинсли бўлса, масалани бир ўлчамли ёки икки ўлчамли тарзда шакллантириш мумкин. Хусусий ҳолда ёмон ўтказувчан қатламга эга икки қатламли ғовак муҳитларда нефтнинг филтрланиш масаласини параболик типдаги бошланғич ва чегаравий шартларга эга тенгламалар тизими каби ёзиш мумкин:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[k_1(x,y) h_1(x,y) \frac{\partial P_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_1(x,y) h_1(x,y) \frac{\partial P_1}{\partial y} \right] = \\ & = \mu \beta h_1(x,y) \frac{\partial P_1}{\partial t} - \frac{k_{\Pi}(x,y)}{h_{\Pi}(x,y)} (P_2 - P_1), \quad (x,y) \in G_1, \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[k_2(x,y) h_2(x,y) \frac{\partial P_2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_2(x,y) h_2(x,y) \frac{\partial P_2}{\partial y} \right] = \\ & = \mu \beta h_2(x,y) \frac{\partial P_2}{\partial t} + \frac{k_{\Pi}(x,y)}{h_{\Pi}(x,y)} (P_2 - P_1) - Q, \quad (x,y) \in G_2; \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & P_1(x,y) = P_{1H}(x,y), \quad P_2(x,y) = P_{2H}(x,y), \quad t = 0, \\ & -k_1 h_1 \frac{\partial P_1}{\partial n} = \lambda \alpha (P_A - P_1); (x,y) \in \Gamma_1, \quad -k_2 h_2 \frac{\partial P_2}{\partial n} = \lambda \alpha (P_B - P_2), \quad (x,y) \in \Gamma_2, \\ & \oint_{s_{i_q}} \frac{k_2 h_2}{\mu} \frac{\partial P_2}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t); \quad (x,y) \in s_{i_q} \quad i_q = 1, 2, \dots \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Бу ерда: P_1, P_2 – куйи ва юқори қатламда босим; P_{1H}, P_{2H} – қатламлардаги бошланғич босим; P_A, P_B – куйи ва юқори қатламдаги чегаравий босим; k_1, k_2 – қатламлар ўтказувчанлиги; k_{Π} – ўтиш қатламининг ўтказувчанлиги; h_1, h_2 – куйи ва юқори қатлам қалинликлари; h_{Π} – ёмон ўтказувчанликка эга қатлам қалинлиги; μ – нефтнинг қовушқоклиги; β – қатламнинг эластиклиги; $q(t)$ – куйи қатламдаги қудукнинг дебети.

(8)-(9) чегаравий масалада ўлчамсиз ўзгарувчиларга ўтамиз ва чекли-айирмалар усули ёрдамида ечамиз. (8) масаланинг вақт қадамининг биринчи ярми учун чекли-айирмали тенгламалар тизими қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\left\{ \begin{aligned} & (3k_1 h_1 - 2h\lambda\alpha) P_{10,j} - 4k_1 h_1 P_{11,j} + k_1 h_1 P_{12,j} = 2h\lambda\alpha P_A, \\ & a_i P_{1i-1,j} - b_i P_{1i,j} + c_i P_{1i+1,j} + d_i P_{2i,j} = -f_i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \\ & (3k_1 h_1 - 2h\lambda\alpha) P_{1N,j} + 4k_1 h_1 P_{1N-1,j} - k_1 h_1 P_{1N-2,j} = -2h\lambda\alpha P_A, \\ & (3k_2 h_2 - 2h\lambda\alpha) P_{20,j} - 4k_2 h_2 P_{21,j} + k_2 h_2 P_{22,j} = 2h\lambda\alpha P_A, \\ & a'_i P_{2i-1,j} - b'_i P_{2i,j} + c'_i P_{2i+1,j} + d'_i P_{1i,j} = -f'_i, \quad j = 1, 2, \dots, M-1, \\ & (3k_2 h_2 - 2h\lambda\alpha) P_{2M,j} + 4k_2 h_2 P_{2M-1,j} - k_2 h_2 P_{2M-2,j} = -2h\lambda\alpha P_A. \end{aligned} \right.$$

Ечимлар қуйидаги рекуррент формулалардан аниқланади:

$$\begin{aligned} P_{1i,j} &= A_i P_{1i+1,j} + B_i P_{2i+1,j} + C_i, & P_{2i,j} &= A'_i P_{2i+1,j} + B'_i P_{1i+1,j} + C'_i, \quad i=0,1,2,\dots,N-1; \\ P_{1N,j} &= (S_2 S'_3 - S_3 S'_1) / (S_1 S'_1 - S_2 S'_2), & P_{2N,j} &= (S_3 S'_2 - S_1 S'_3) / (S_1 S'_1 - S_2 S'_2); \end{aligned}$$

Бу ерда

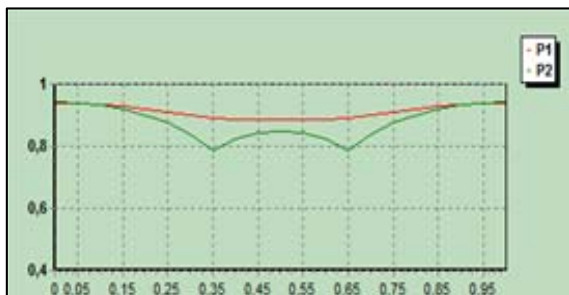
$$\begin{aligned} S_1 &= [(3a_{N-1} - c_{N-1}) - (4a_{N-1} - b_{N-1})A_{N-1} - d_{N-1}B'_{N-1}], \\ S_2 &= [-(4a_{N-1} - b_{N-1})B_{N-1} - d_{N-1}A'_{N-1}], \quad S_3 = [f_{N-1} + d_{N-1}C'_{N-1} + (4a_{N-1} - b_{N-1})C'_{N-1}], \end{aligned}$$

$$S'_1 = \left[(3a'_{N-1} - c'_{N-1}) - (4a'_{N-1} - b'_{N-1})A'_{N-1} - d'_{N-1}B_{N-1} \right],$$

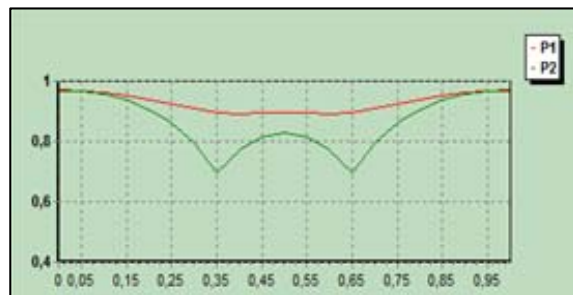
$$S'_2 = \left[-(4a'_{N-1} - b'_{N-1})B'_{N-1} - d'_{N-1}A_{N-1} \right], \quad S'_3 = \left[f'_{N-1} + d'_{N-1}C_{N-1} + (4a'_{N-1} - b'_{N-1})C_{N-1} \right].$$

Вақт r -қатламнинг иккинчи ярми учун ҳисоблашлар юқоридаги каби амалга оширилади.

Ҳисоблаш тажрибалари қовушқоқлик коэффициентининг $\mu = 4сПз$ (6-расм) ва $\mu = 8сПз$ (7-расм) қийматлари учун ўтказилган.



6-расм. 360 суткали ҳисоблаш натижалари. $k_1=0.05$ Д, $k_2=0.1$ Д, $\mu=4сП$, $P_1=P_2=200$ атм.



7-расм. 360 суткада ҳисоблаш натижалари. $k_1=0.05$ Д, $k_2=0.1$ Д, $\mu=8сП$, $P_1=P_2=200$ атм.

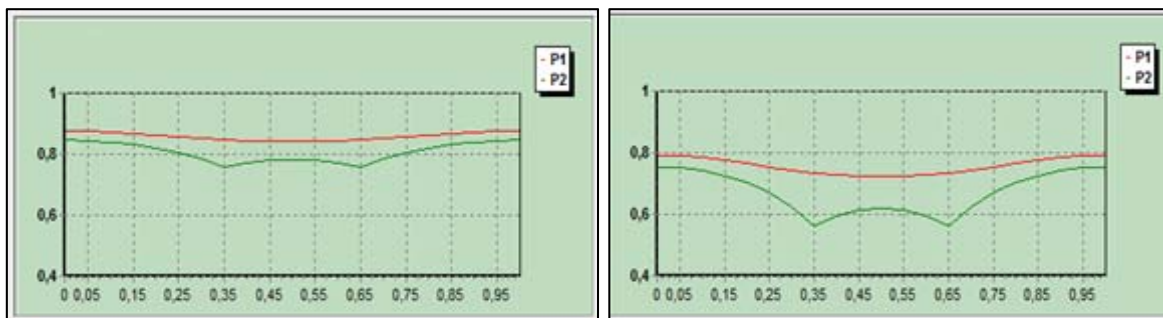
Расмлардаги эгри чизиклардан кўриниб турибдики, ишлаётган кудуқларда босимнинг катта тезлик билан пасайиши кузатилади, биринчи қатламдаги босимнинг пасайиши қовушқоқлик ва ёмон ўтказувчан қатламнинг ўтказувчанлик коэффициентиға боғлиқлигини кўрсатади.

Орасида ёмон ўтказувчан қатлам бўлган икки қатламли ғовак муҳитларда газнинг фильтрацияси масаласини қуйидаги чегаравий масала кўринишида бериш мумкин:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[k_1(x,y)h_1(x,y) \frac{\partial P_1^2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_1(x,y)h_1(x,y) \frac{\partial P_1^2}{\partial y} \right] = \right. \\ & \left. = 2\mu\alpha_1 m_1 h_1(x,y) \frac{\partial P_1}{\partial t} - \frac{k_{\Pi}(x,y)}{h_{\Pi}(x,y)} (P_2^2 - P_1^2), (x,y) \in G_1 \text{ бўлганда,} \right. \\ & \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[k_2(x,y)h_2(x,y) \frac{\partial P_2^2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_2(x,y)h_2(x,y) \frac{\partial P_2^2}{\partial y} \right] = \right. \\ & \left. = 2\mu\alpha_2 m_2 h_2(x,y) \frac{\partial P_2}{\partial t} + \frac{k_{\Pi}(x,y)}{h_{\Pi}(x,y)} (P_2^2 - P_1^2) - Q, (x,y) \in G_2 \text{ бўлганда,} \right. \\ & \left. \left\{ \begin{aligned} & P_1(x,y) = P_{1H}(x,y), P_2(x,y) = P_{2H}(x,y), t = 0, -\frac{k_1 h_1}{\mu} \frac{\partial P_1}{\partial n} = \alpha (P_A - P_1); (x,y) \in \Gamma_1, \\ & -\frac{k_2 h_2}{\mu} \frac{\partial P_2}{\partial n} = \alpha (P_B - P_2) \quad (x,y) \in \Gamma_2, \oint_{s_{i_q}} \frac{k_i h_i}{\mu} \frac{P}{P_{ам}} \frac{\partial P_i}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t); (x,y) \in s_{i_q} \quad i_q = 1, 2, \dots \end{aligned} \right. \right. \end{aligned} \right.$$

Масалани ечиш учун ўзгарувчан йўналишлар усули, квазилинеаризация ва итерация усулидан фойдаланилди. Итерация жараёни $\max_{i,j} |P_{i,j}^{(s)} - P_{i,j}^{(s-1)}| \leq \varepsilon$ шарт бажарилгунча давом этади.

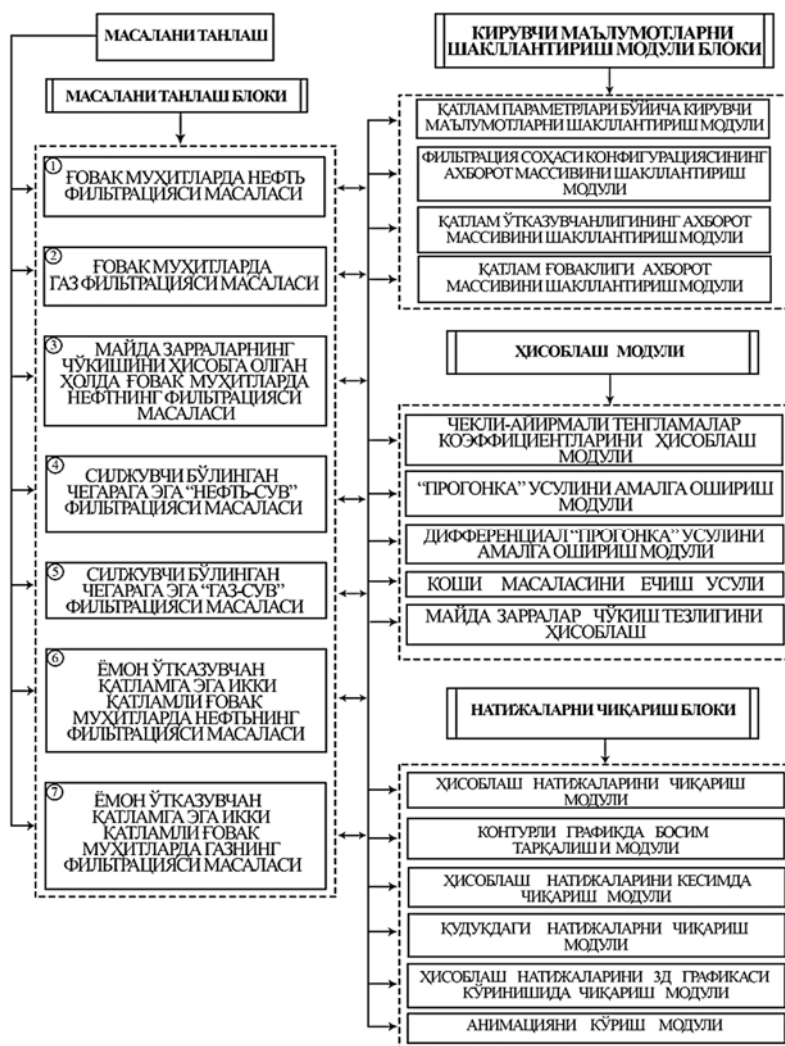
Ҳисоблаш тажрибалари ўтказувчанлик ва қовушқоқлик коэффициентларининг турли қийматларида ўтказилди.



8-расм. Ҳисоблаш натижалари: $k_1=0.01$ Д, $k_2=0.02$ Д, $k_n=0.0000001$ Д, $\mu=0.01$ сПз. 9-расм. Ҳисоб натижалари: $k_1=0.01$ Д, $k_2=0.02$ Д, $k_n=0.0000001$ Д, $\mu=0.02$ сПз.

8 - 9 - расмлардан кўринадики, газнинг қовушқоқлик коэффиценти ортиши қатламда босимнинг тарқалишининг сустлашишига, қатлам ўтказувчанлик коэффиценти ортиши эса босимнинг тарқалишининг жадаллашишига олиб келади.

Диссертациянинг бешинчи «Нефть ва газ конлари асосий кўрсаткичларини аниқлаш учун дастурий мажмуа» бобида нефть ва газ конлари ишлашининг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш ва тадқиқот натижаларини визуал кўринишда тақдим этиш учун ишлаб чиқилган дастурий мажмуа тавсифланган.



10-расм. Дастурий мажмуанинг функционал схемаси

10-расмда ишлаб чиқилган дастурий мажмуанинг функционал схемаси келтирилган.

Дастурий таъминот олинган натижаларни таҳлил қилишни осонлаштириш мақсадида маълумотларни экранда визуаллаштириб жадвал ва график кўринишларда мулоқот асосида ташкил қилиб беради.

«Нефть конлари ишлаши жараёнининг аосий кўрсаткичларини ҳисоблаш» дастурий таъминоти нефт конлари ишлашини таҳлил қилиш, башорат қилиш ва лойиҳалаш ишларида қўллаш мумкин.

Дастурий таъминот қуйидагилардан ташкил топган:

- Бошланғич маълумотларни киритиш: ишлаш вақти, бошланғич қатлам босими, вақт бўйича кадам, ўтказувчанлик коэффиценти, қатлам ғоваклиги, нефть қовушқоқлиги, қатлам узунлиги ва қуввати ҳамда қудуқ дебити ва координаталари.

- Қатламда босимнинг тарқалиш натижаларини жадвал кўринишида тасвирлаш.

- Натижаларни график кўринишида визуал формада тасвирлаш. Бунда натижалар қуйидаги кўринишда акс этади: босимнинг тарқалиши контур графика кўринишида, қудуқларда вақт оралиғида босимнинг пасайиши; кесимда босимнинг тарқалиши.

- Фильтрация муҳитининг конфигурациясини танлаш: айлана; тўртбурчак; эллипс; кўпбурчак; ихтиёрий.

- Фильтрация муҳити конфигурацияси ва қатлам ўтказувчанлигининг информацион массивини кўриш.

ХУЛОСА

«Суюқлик ва газларнинг филтрланиш жараёнини тадқиқ қилиш учун математик моделлар, сонли усуллар ва дастурлар мажмуи» мавзусидаги диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Нефть ва газ қатламларининг тузилишини ҳисобга оладиган ва бир жинсли бўлмаган ностационар фильтрация жараёнларининг математик моделларини куришда фойдаланиладиган ахборот моделлари шакллантирилди. Ушбу моделлар ностационар фильтрация жараёнларининг математик моделларини куришга хизмат қилди.

2. Мураккаб конфигурацияли фильтрация соҳалари ва майда зарраларнинг ғовак муҳитда чўкишини ҳисобга олган ҳолда суюқлик ва газ ностационар фильтрация жараёнларининг математик моделлари ва ўзгарувчан йўналишлар усули асосида икки ўлчовли чегаравий масалани ечишнинг ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилди. Математик ва сонли моделлар қатлам ўтказувчанлиги ва ғоваклиги коэффицентларига таъсир кўрсатадиган майда заррачаларнинг ғовак муҳитда тутилиб қолиш омилини

ҳисобга олувчи, суюқлик ва газ фильтрацияси назариясининг қонунларига мос равишда фильтрация жараёнларини тавсифлаш учун хизмат қилади.

3. Қатлам босимини сунъий сақлашда силжувчи нефть-сув ва газ-сув чегаралари ҳосил бўладиган ностационар фильтрация жараёнларининг математик моделлари такомиллаштирилди. Ушбу модел нефть ва газ қатламли муҳитга сув ҳайдаш орқали босимни сунъий сақлаш ва вақт ўтиши билан ўзгариш жараёнларини батафсил баён этиш учун хизмат қилди.

4. Дифференциал-айирмали ва ўзгарувчан йўналишлар усулидан фойдаланиб, нефть-сув ва газ-сув биргаликдаги фильтрациясининг Стефан типдаги масалаларини ечиш учун самарали ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилди. Ушбу алгоритмлар нефть-сув ва газ-сув муҳитлари чегараларини контур ташқарисидан, контурдан ва блокли режимда сув қуйилиши шароитида фильтрация жараёнларини ўрганишга имкон яртди.

5. Нефть ва газ қатларини сув ҳайдаш режимида ишлашда суюқлик ва газнинг қовушқоқлиги қатлам ўтказувчанлиги ва қудуқлар дебитларининг таъсири тадқиқ қилинган. Нефть ва газ қовушқоқлигининг ортиши умумий чегарада босим қийматининг ортишига, сувли зонада эса босимнинг секин тарқалишига хизмат қилди.

6. Уч ўлчовли фильтрация масаласини ечишнинг чекли-айирмалар ва дифференциал-айирмали усуллар асосидаги тақрибий-аналитик ечиш усули ишлаб чиқилди. Натижада вақт бўйича аппроксимациянинг ошқормас схемасини қўллаш асносида сиқиладиган ва сиқилмайдиган муҳитлар фильтрацияси масалаларининг тақрибий-аналитик ечимини қуриш имконини берди.

7. Ёмон ўтказувчан қатламга эга динамик алоқада бўлган икки қатламли ғовак муҳитларда нефть ва газ фильтрацияси жараёнларининг математик моделлари ва ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган. Натижада маҳсулдор қатламлар ўзаро таъсирлашувини тадқиқ қилиш имкони яратилди.

8. Ишлаб чиқилган сонли усуллар аппроксимациясининг $O(\tau + h^2)$ аниқлигини таъминлашга, газ фильтрацияси масаласини ечишда квазилинеаризация усулидан ҳамда қатлам ва қудуқлар ҳақидаги ахборот массивлардан фойдаланишга хизмат қилди. Натижада нозикли масалаларни ечишда итерацион жараёнларнинг яқинлашувини тезлашишига ва ҳисоблаш жараёнини қисқартиришга эришилди.

9. Фойдаланувчи учун қулай интерфейсга эга дастурий восита: нефть ва газ учун; ҳисоб соҳасининг қатламнинг берилган қалинлигида тўртбурчак, айлана, эллиптик ва ихтиёрий шакллари учун; қатлам фильтрацион кўрсаткичларининг ўзгармас ва ўзгарувчан холи учун; берувчи ва олувчи қудуқларнинг ихтиёрий сони ҳамда уларнинг координаталари ва дебитлари учун ҳисоб ишлари олиб бориш имконини берди.

10. Диссертация тадқиқоти доирасида ишлаб чиқилган математик моделлар, сонли усуллар, алгоритмлар ва дастурий маҳсулотлар ҳамда сонли

натижалар «Муборакнефтгаз» МЧЖ, «Джаркурганнефть» АК, «Шуртаннефтегаз» МЧЖ, «Касансой нефтгаз разведка экспедицияси» МЧЖ ва «ГидроИНГео институт» Давлат корхонасида жорий қилинган. Натижада конлар ишлашининг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш вақти 8-10 марта камайтирилди ва тажриба натижалари билан таққослаганда 85% аниқлик даражасига эришилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.Т.07.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

НАЗИРОВА ЭЛМИРА ШОДМОНОВНА

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И
КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК (DSc)**

Ташкент – 2019

Тема докторской диссертации по техническим наукам (DSc) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2018.2.DSc/T170.

Диссертация выполнена в Ташкентском университете информационных технологий.

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

Научный консультант:

Равшанов Нормакмад

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Арипов Мирсаид

доктор физико-математических наук, профессор

Хужаев Исматулла Кушаевич

доктор технических наук, с.н.с.

Хабибуллаев Иброхим Хабибуллаевич

доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

Самаркандский государственный университет

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 г. в __ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий (адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер №__). (Адрес: 100202, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2019 года.

(Протокол рассылки №__ от «__» _____ 2019 г.).

Р.Х. Хамдамов

Председатель научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

Ф.М. Нуралиев

Ученый секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., доцент

А.М. Полатов

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (Аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире уделяется особое внимание созданию математических моделей газо-гидродинамических процессов, совершенствованию математических моделей нестационарных процессов жидкостей, использованию возможностей численных методов и инфокоммуникационных технологий для решения линейных и нелинейных задач теории фильтрации, а также созданию автоматизированных систем для определения и прогноза основных показателей разработки нефтяных и газовых месторождений. Математические модели нестационарных процессов фильтрации нефти и газа, разработка вычислительных алгоритмов и создание программных средств имеют важную особенность в таких развитых странах мира, как США, Франция, Китай, ОАЭ, Иран, Российская Федерация, Украина, Казахстан, Азербайджан и др.

В мире ведутся научные исследования, направленные на создание математической модели процессов фильтрации нефти и газа в пористой среде, на разработку алгоритмов и систем программного обеспечения расчета основных показателей нефтяных и газовых месторождений, на создание геологических, гидродинамических 3D-моделей объектов нефтяных и газовых месторождений, на проведение вычислительных экспериментов для исследования процессов фильтрации, а также на исследование полученных результатов. В этом направлении, в частности, в исследовании сложных процессов движения нефти и газа в многопластовой пористой среде и построении математических моделей определения реальных объектов, разработка вычислительного алгоритма и создание автоматизированных систем являются важными задачами. Вместе с этим необходимо разработать численные и аналитические методы, эффективные алгоритмы решения нелинейных задач для области фильтрации со сложной конфигурацией.

В нашей Республике проводятся широкомасштабные исследования по проектированию процессов эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, по разработке математических моделей нестационарных процессов фильтрации неоднородных жидкостей и алгоритмов исследования нелинейных газо- и гидродинамических процессов, по оценке основных показателей с использованием современных компьютерных технологий, а также по созданию автоматизированных программных обеспечений. В Стратегии дальнейшего развития Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены такие задачи, как «... внедрение информационно-коммуникационных технологий в экономике, в социальной сфере и управлении, ... расширение использования возобновляемых источников энергии»¹. При реализации этих задач важными вопросами являются разработка интегрированных математических моделей, численных моделей,

¹ Указ Президента Республики Узбекистан УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии дальнейшего развития Республики Узбекистан».

эффективных вычислительных алгоритмов и автоматизированных систем для процессов проектирования нестационарных процессов фильтрации неоднородных жидкостей и газов в пористых средах на основе современных информационных технологий.

Данное диссертационное исследование в значительной степени послужит 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-3107 от 30 июня 2017 года «О мерах по совершенствованию системы управления нефтегазовым сектором» и ПП-2614 от 28 сентября 2016 года «О мерах по увеличению производства экспортно-ориентированной готовой продукции на основе глубокой переработки углеводородов в 2016-2020 годах», а также в других нормативно-правовых актах, связанных с этой деятельностью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии в Республике IV - «Информатизация и развитие информационно-коммуникационных технологий».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации.² Научными исследованиями, направленными на разработку математических моделей, эффективных алгоритмов и программного обеспечения для решения задач фильтрации жидкостей в пористой среде, занимаются в ведущих научных центрах мира и высших образовательных учреждениях, в том числе в Mineral Engineering at the Pennsylvania State University, University of Texas at Austin, Missouri University of Science and Technology (США), Robert Gordon University (Великобритания), Institut Français du Pétrole (Франция), Polytechnic University of Turin (Италия), Technical University of Denmark (Дания), East China University of Science and Technology (Китай), University of Petroleum & Energy Studies Dehradun (Индия), Petroleum Institute Abu Dhabi (ОАЭ), Российском Государственном университете нефти и газа имени И.М.Губкина (Российская Федерация), Государственном университете Азербайджана (Азербайджан), Казахстанско-Британском техническом университете (Казахстан), Ташкентском университете информационных технологий (Узбекистан).

В результате исследований, проведенных в мире по моделированию нестационарных процессов фильтрации жидкостей и газа нефтяных и газовых месторождений, численные модели задачи неоднородных фильтраций и разработка вычислительных алгоритмов для решения задач фильтрации жидкости в пористых средах были получены следующие результаты: разработаны математические модели нестационарных процессов

² Для обзора зарубежных научных исследований по теме диссертации использованы источники Department of Physics, University of California, Berkly, California 94720, USA, Department of Aerospace Engineering, Department of Energy Engineering and Science, Nagoya University Nagoya, Japan и др.

фильтрационного движения жидкостей и газа в пористых средах с учетом динамической связи между пластами (University of Pittsburgh, США); созданы математические модели процесса разработки нефтегазовых месторождений с учетом вероятностного распределения параметров объекта исследования (Robert Gordon University, Великобритания); разработаны математические модели контроля и управления технологическими процессами, связанными с движением структурированных неоднородных жидкостей со сложными характеристиками, а также численные модели вытеснения высоковязкой нефти водой (Казанский инновационный университет имени В.Г.Тимирязова, Кубанский государственный технологический университет, Российская Федерация).

В мире прилагается ряд усилий по повышению эффективности пласта разработки нефтяных и газовых месторождений, проводятся исследования по следующим приоритетным направлениям: разработка математических моделей, численных методов и эффективных алгоритмов процессов по увеличению добычи нефти; разработка методов заводнения нефтяных пластов для искусственного поддержания пластового давления; разработка математической модели прогнозирования и определения объема запаса нефти по основным показателям разработки, создание информационных систем с функциями мониторинга добычи нефти и газа, создание программного обеспечения для повышения экономической эффективности эксплуатации нефтяных и газовых месторождений.

Степень изученности проблемы. Разработка и усовершенствование математических моделей сложных динамических процессов фильтрации в нефтегазовых и водоносных пластах, а также численных методов для их решения, решение стационарных и нестационарных задач фильтрации в слоях нефти и газа с плохой проницаемостью рассмотрены в работах таких ученых, как M.Sharma, X.Азиз, Э.Сеттари, N.B.Lopuh, C.Atkinson, K.Ives, Z.Mehdi, P.J.Monteiro, S.Banerjee, G.I.Barenblatt, M.Chraibi, D.B.Silin, F.Boyer, C.Lapuerta, S.Minjeaud, А.Дарси, Л.С.Лейбензон, А.Х.Мирзаджанзаде, М.М.Хасанов, Б.Б.Лапук, К.С.Басниев, С.Н.Закиров, Д.Ж.Ахмед-Заки, А.В.Ахметзянов, А.Никифоров, А.В.Цепаев и др.

В Республике Узбекистан математические модели и вычислительные методы для исследования нестационарных процессов фильтрации многофазных жидкостей и газов в пористых средах изучены в исследованиях таких ученых, как Ф.Б.Абуталиев, Ж.Ф.Файзуллаев Н.М.Мухидинов, Р.Садуллаев, А.Бегматов, Б.Х.Хўжаёров, М.Арипов, И.Алимов, Н.Равшанов, У.С.Назаров, Ш.Каюмов, Я.Ярбеков, А.Мирзаев и др. Проблемы автоматизации решения некоторых краевых задач по модульному принципу представлены в работах В.К.Кабулова, Ф.Б.Абуталиева, А.Нематова, В.Ф.Бурнашева и других ученых.

Анализ исследований в этой области показывает, что в настоящее время недостаточно изучены процессы нестационарной фильтрации газа и жидкости с учетом оседания мелких частиц в порах среды, когда область

фильтрации имеет сложную конфигурацию и является многослойной пористой средой с разной проницаемостью при наличии гидродинамической связи между пластами.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, в котором выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Ташкентского университета информационных технологий и Научно-инновационного центра информационно-коммуникационных технологий при ТУИТ в рамках грантов № Ф4-ФА-Ф005 «Разработка и исследование алгоритмических методов решения классов многомерных нелинейных задач математической физики для областей сложной конфигурации» (2012-2016) и № А5-019 «Разработка информационного и программного обеспечения задач тепломассообмена в процессах сушки и хранения пористых сред» (2015-2017).

Целью исследования является разработка математических моделей, эффективных вычислительных алгоритмов и комплекса программ для определения основных показателей многослойных нефтяных и газовых месторождений.

Задачи исследования:

формирование информационных моделей, учитывающих строение нефтяных и газовых залежей, свойства неоднородности фильтрационных потоков и используемых при построении математических моделей нестационарных процессов фильтрации;

разработка математических моделей и вычислительных алгоритмов нестационарных процессов фильтрации жидкостей и газов в области со сложной конфигурацией с учетом осаждения мелкодисперсных частиц в порах;

усовершенствование математических моделей нестационарных процессов фильтрации с подвижной границей раздела нефть-вода и газ-вода для искусственного поддержания пластового давления;

разработка эффективных алгоритмов для решения задач фильтрации с учетом движущейся границы раздела нефть-вода и газ-вода;

разработка математической модели и их приближенно-аналитических методов решения задач фильтрации жидкости в многослойных пористых средах;

разработка численных моделей задач фильтрации нефти и газа в двухпластовых пористых средах со слабопроницаемой перемычкой при наличии динамической связи между пластами;

разработка вычислительных алгоритмов для определения основных показателей многослойных нефтяных и газовых месторождений с плохопроницаемой перемычкой;

разработка комплекса программ для расчета основных показателей эксплуатации одно- и многослойных нефтяных и газовых месторождений с визуализацией результатов исследования.

Объектом исследования являются нестационарные процессы фильтрации жидкостей и газов в одно- и многослойных пористых средах.

Предмет исследования являются математические модели, численных методов и алгоритмов, а также комплекс проблемно-ориентированных программных обеспечений для исследования нестационарных процессов фильтрации жидкостей и газа в пористых средах.

Методы исследования. В процессе исследования применяются методы вычислительной математики, математического и компьютерного моделирования и вычислительного эксперимента, а также способы технологии программирования для разработки программных продуктов.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

разработаны математические модели и вычислительные алгоритмы нестационарного процесса фильтрации жидкостей и газа в областях со сложной конфигурацией с учетом фактора осаждения мелкодисперсных частиц в пористой среде;

на основе теории движения жидкости и газа усовершенствованы математические модели нестационарных процессов совместной фильтрации нефть-вода и газ-вода с искусственным поддержанием пластового давления за счет закачки воды в нефте- и газоносный пласты;

разработаны эффективные вычислительные алгоритмы на основе совместного использования методов переменных направлений и дифференциальной прогонки для решения задач типа Стефана при совместной фильтрации нефть-вода и газ-вода;

разработан приближенно-аналитический метод решения трехмерной задачи фильтрации жидкостей в многослойных пористых средах с соответствующими начальными, граничными и внутренними условиями на основе совместного использования метода дифференциальной прогонки и метода прямых;

на основе законов движения жидкостей и газа разработаны численные модели задач фильтрации нефти и газа в динамически связанных двухслойных пористых средах со слабопроницаемой перемычкой;

на основе численных моделей задач фильтрации жидкостей и газа в двухпластовых средах со слабопроницаемой перемычкой разработан вычислительный алгоритм для расчета основных показателей разработки нефтяных и газовых месторождений.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

созданы вычислительные алгоритмы и программное обеспечение с учетом осаждения мелкодисперсных частиц в пористых средах для расчета основных показателей разработки нефтяных и газовых месторождений;

на основе математической модели, учитывающей повышение давления, закачивание воды в нефтяные и газовые месторождения с низким давлением

пласта, созданы эффективные вычислительные алгоритмы для расчета основных показателей;

разработаны численные и компьютерные модели процессов фильтрации нефти и газа в пористых средах при наличии динамических связей между пластами;

созданы эффективные вычислительные алгоритмы определения основных показателей нефтяных и газовых месторождений при наличии динамической связи между пластами со слабопроницаемой перемычкой, а также программное обеспечение для визуализации соответствующих результатов.

Достоверность результатов исследования. Достоверность научных результатов обеспечивается строгостью использованных математических моделей, разработанных с применением законов сохранения массы и импульса, апробированных методов вычислительной математики, в том числе применением численных методов проверена их устойчивость, их соответствие реальным физическим процессам, а также качественной и количественной оценкой полученных результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в разработке усовершенствованных математических моделей фильтрационных процессов, которые учитывают временные изменения пористости среды за счет осаждения частиц в порах, изменения границ нефть-вода и газ-вода в режиме вытеснения водой, структуры пористой среды, слою которой отличаются гидродинамическими и геологическими показателями, а также более точных и экономичных численных алгоритмов решения двух- и трехмерных задач фильтрации с привлечением преимуществ методов: переменных направлений, дифференциально-разностного и дифференциальной прогонки.

Практическая значимость результатов диссертационной работы выражается в разработке программного комплекса для прогнозирования и анализа годовых и суточных изменений основных показателей разработки нефтяных и газовых месторождений при различных внутренних и внешних условиях, а также характеризуется практическим применением вычислительных алгоритмов, математических моделей решения двух- и трехмерных задач сложных нестационарных процессов фильтрации газа и жидкостей.

Внедрение результатов исследования. На основе математических моделей, вычислительных алгоритмов и комплекса программного обеспечения для определения основных показателей эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, с учетом динамических связей между гидродинамическими параметрами пластов:

дано заключение со стороны «UNICON.UZ» ДУК о возможности проведения вычислительных экспериментов по основным показателям нефтяных и газовых месторождений и прогнозированию эксплуатации нефтяных и газовых месторождений программными средствами «Расчет

основных показателей разработки газового месторождения», «Программное обеспечение математической модели процесса фильтрации нефти в пористых средах», «Разработка программной среды для расчета основных показателей эксплуатации газовых месторождений в двухпластовой среде с динамическими связями», «Программная среда для решения задачи фильтрации нефти в двухслойной среде» (Заключение «UNICON.UZ» ДУК от 17 декабря 2018 г.). В результате стало возможным учитывать осаждение мелких частиц в пористых средах, искусственное поддержание давления путем закачивания воды в пласт, определение изменения давления по времени в многослойной среде со слабопроницаемой перемычкой;

математическая модель, численный метод, вычислительный алгоритм и комплекс программного обеспечения процессов нестандартной фильтрации жидкостей и газов в двумерных пористых средах с учетом скорости осаждения мелких частиц в пористых средах внедрены к практической деятельности в ООО «Муборакнефтьгаз» (Справка Министерства развития информационных технологий и коммуникаций № 33-8/8368 от 8 ноября 2018 г.). В результате сравнения полученных экспериментальных данных приближенность составила 15%, а также сократилось время вычислительного процесса в 8-10 раз;

разработанное на основе алгоритмов численного решения задач фильтрации жидкости в пористых средах программное обеспечение внедрено в нефтяных и газовых месторождениях на территории Сурхандарьинской области АО «Джаркурганнефть» (Справка Министерства развития информационных технологий и коммуникаций № 33-8/8368 от 8 ноября 2018 г.). В результате, эффективность пласта при заводнении пластов нефти, повысилась до 10%;

результаты исследований по определению основных показателей разработки нефтяных и газовых месторождений внедрены в ООО «Касансой нефтьгаз разведка экспедиция» (Справка Министерства развития информационных технологий и коммуникаций № 33-8/8368 от 8 ноября 2018 г.). В результате это дало возможность прогнозирования и анализа основных показателей двухпластовых нефтяных месторождений, а также увеличить производительность пласта на 8-10%;

численные модели процесса фильтрации газа в двухслойных пористых средах и программное обеспечение внедрены в ООО «Шуртаннефтегаз» (Справка Министерства развития информационных технологий и коммуникаций от № 33-8/8368 8 ноября 2018 г.). В результате за счет автоматизации процесса многослойной фильтрации газа и оперативности вычислительных работ, производительность скважин увеличилась на 8-10%, а их стоимость была снижена на 8%;

математическая модель нестационарных процессов фильтрации сильнозагрязненной нефти в пористых средах, численные алгоритмы и комплекс программ внедрены в практической деятельности государственного предприятия «Институт ГИДРОИНГЕО» (Справка

Министерства развития информационных технологий и коммуникаций № 33-8/8368 от 8 ноября 2018 г.). В результате дало возможность увеличения производительности нефтяных и газовых месторождений на 9-10%.

Апробация результатов. Теоретические и прикладные результаты данного исследования докладывались и обсуждались на 9 международных и 15 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации. По теме исследования опубликованы 37 научных работ, из них 11 научные статьи, 2 в зарубежных и 9 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, а также получены 5 свидетельств о регистрации программных средств для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит 197 страниц и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, объект и предмет исследования, показано соответствие исследования приоритетному направлению развития науки и технологий республики, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений в практику результатов исследования, результаты апробации работы, сведения о публикации результатов работы и структура диссертации.

В первой главе диссертации **«Состояние вопроса, цель и задачи исследования процесса фильтрации нефти и газа в пористых средах»** приведены обзор и анализ литературных источников по математическому моделированию нестационарных процессов фильтрации нефти и газа в пористой среде. Рассмотрено сегодняшнее состояние математического моделирования процессов фильтрации в многослойной пористой среде и изучена тенденция его развития. Рассмотрена задача информационного обеспечения математического моделирования нестационарных процессов фильтрации нефти и газа в пористой среде.

На основе информационной модели можно правильно сформулировать постановку задачи, провести расчеты, проанализировать функциональность объекта, показать известные и новые закономерности, а также понять множество научных гипотез о структуре и строении объекта с его нераскрытыми параметрами. Для построения информационной модели объекта необходимо использовать следующие принципы: целенаправленность, полноту отражения, адекватность, совместимость,

модульность, простота в использовании, стандартизация и унификация, соответствие и непрерывность.

Построение информационной модели для определения основных показателей месторождений нефти и газа позволяет разработать математическую модель, которая адекватно отражает задачу фильтрации нефти и газа в многослойной пористой среде, и определить основные показатели объекта на ЭВМ.

Во второй главе диссертации «**Математические модели и численные алгоритмы решения задач фильтрации нефти и газа в пористой среде**» предложены математические модели фильтрационного процесса нефти и газа с учетом осаждения мелкодисперсных частиц в порах среды и численные методы решения задач, сформулированных на основе этих моделей, алгоритмы решения задач и обсуждены полученные численные результаты. В первом параграфе приведены математическая модель нестационарной фильтрации нефти в неоднородной произвольной двумерной пористой среде с учетом осаждения мелкодисперсных частиц в порах и метод численного решения задачи, построенный на основе метода переменных направлений.

Краевая задача формулируется следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta h(x,y) \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - Q \\ \frac{d\eta}{dt} = \lambda(\theta_0 - \gamma\eta) \quad \text{при } (x,y) \in G, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P(x,y) = P_H; \quad \eta(t) = \eta_0 \quad \text{при } t = 0, \\ \frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_A - P) \quad \text{при } (x,y) \in \Gamma, \\ \oint_{S_{i_q}} \frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t), \quad \text{при } (x,y) \in S_{i_q}, \quad i_q = \overline{1, N_q}, \\ m = m_1 + \eta(m_0 - m_1), \quad k = k_0(1 - \sqrt{\eta})^3, \quad \beta = m\beta_H + \beta_c. \end{array} \right. \quad (2)$$

Здесь P – давление в пласте; P_H – начальное пластовое давление; P_A – приграничное давление нефти; μ – вязкость нефти; k – коэффициент проницаемости пласта; k_0 – коэффициент начальной проницаемости пласта; h – мощность пласта; β – коэффициент упругоёмкости; β_H – коэффициент сжимаемости нефти; β_c – коэффициент сжимаемости пласта; m – коэффициент пористости пласта; m_0 – начальная пористость; m_1 – пористость осевшей массы; q_{i_q} – дебит i_q -й скважины; S_{i_q} – контур i_q -й скважины; n – внутренняя нормаль к границе Γ ; N_q – количество скважин; η – скорость осаждения частиц в пористых средах; γ – параметр фильтрации; λ – кинематический коэффициент осаждения частиц.

При численном решении задачи (1)-(2) методом конечных разностей введем следующие безразмерные переменные:

$$P^* = P/P_0, \quad x^* = x/L, \quad y^* = y/L, \quad k^* = k/k_0, \quad h^* = h/h_0, \\ \eta^* = \eta/\eta_0, \quad \tau = \frac{k_0 t}{\beta \mu L^2}, \quad q^* = \frac{q \mu}{\pi k_0 P_0 h_0}, \quad \lambda^* = \frac{k_0 \lambda}{\beta \mu \eta_0 L^2}, \quad \alpha^* = \frac{\mu L}{k_0 h_0}.$$

Для простоты будем опускать звёздочки и переписываем задачи (1)-(2) следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} h \frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - Q, \\ \frac{d\eta}{d\tau} = \lambda(\theta_0 - \gamma\eta) \text{ при } (x,y) \in G; \\ P(x,y) = P_H, \quad \eta(t) = \eta_0 \text{ при } t = 0, \\ -k(x,y)h(x,y) \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_A - P) \text{ при } (x,y) \in \Gamma, \\ \oint_{S_{i_q}} k(x,y)h(x,y) \frac{\partial P}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t) \text{ при } (x,y) \in S_{i_q}, \quad i_q = 1, 2, \dots \\ m = m_1 + \eta(m_0 - m_1), \quad k = k_0 \left(1 - \sqrt{\eta}\right)^3. \end{array} \right. \quad (3)$$

Для решения задачи используется алгоритмическая идея схемы переменных направлений. Переход от r -го временного слоя к $r+1$ -му слою совершается в два этапа с шагом $0.5\Delta\tau$. Для решения полученной системы конечно-разностных уравнений применяется метод прогонки.

Для нахождения скорости осаждения частиц η в пористой среде аппроксимируем второе уравнение системы (1) по τ и получаем следующую формулу:

$$\eta_{i,j} = \frac{\lambda\Delta\tau\theta_0 + \hat{\eta}_{i,j}}{1 + \gamma\lambda\Delta\tau},$$

где $\hat{\eta}_{i,j}$ - значение $\eta_{i,j}$, которое взято из предыдущего r -го временного слоя, а начальное значение берется из начальных условий (3).

Найденное значение $\eta_{i,j}$ используется для определения пористости m и проницаемости k пласта на каждом временном слое.

Математическая модель процесса нестационарной фильтрации газа в пористой среде с осаждением мелкодисперсных частиц в порах описывается следующим нелинейным дифференциальным уравнением параболического типа с начальными и граничными условиями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P^2}{\partial y} \right) = 2amh(x,y) \frac{\partial P}{\partial t} - Q, \text{ при } (x,y) \in G, \\ P(x,y) = P_H(x,y) \text{ при } t=0, (x,y) \in G, \\ - \frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{\partial P(x,y,t)}{\partial n} = \alpha(P_A - P) \text{ при } (x,y) \in \Gamma, \\ \oint_{S_{i_q}} \frac{k(x,y)h(x,y)}{\mu} \frac{P}{P_{am}} \frac{\partial P}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t) \text{ при } (x,y) \in s_{i_q}, i_q = 1, 2, \dots \end{array} \right. \quad (4)$$

Для решения краевой задачи (4) переходим к безразмерным переменным. Применяя метод переменных направлений, получаем конечно-разностное уравнение для $r+0.5$ -го промежуточного временного слоя для внутренних узлов:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{P}_{i,j} - \hat{P}_{i,j}}{\Delta \tau / 2} &= \frac{T_{i-0.5,j} \bar{P}_{i-1,j}^2 - (T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j}) \bar{P}_{i,j}^2 + T_{i+0.5,j} \bar{P}_{i+1,j}^2}{\Delta h_x^2} + \\ &+ \frac{T_{i,j-0.5} \hat{P}_{i,j-1}^2 - (T_{i,j-0.5} + T_{i,j+0.5}) \hat{P}_{i,j}^2 + T_{i,j+0.5} \hat{P}_{i,j+1}^2}{\Delta h_y^2} - \delta_{i,j} q_{i,j}. \end{aligned}$$

Так как полученное конечно-разностное уравнение нелинейное относительно функции давления P , то используются метод квазилинеаризации и итерационный метод. Тогда конечно-разностное уравнение приводится к следующему квазилинейному разностному виду:

$$\begin{aligned} \frac{2}{\Delta h_x^2} T_{i-0.5,j} \bar{P}_{i-1,j} \bar{P}_{i-1,j} - \left[\frac{2}{\Delta h_x^2} (T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j}) \bar{P}_{ij} + \frac{1}{\Delta \tau / 2} \right] \bar{P}_{ij} + \frac{2}{\Delta h_x^2} T_{i+0.5,j} \bar{P}_{i+1,j} \bar{P}_{i+1,j} &= \frac{1}{\Delta h_x^2} \left[T_{i-0.5,j} \bar{P}_{i-1,j}^2 - \right. \\ \left. - (T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j}) \bar{P}_{ij}^2 + T_{i+0.5,j} \bar{P}_{i+1,j}^2 \right] - \frac{1}{\Delta h_y^2} \left[T_{i,j-0.5} \hat{P}_{ij-1}^2 - (T_{i,j-0.5} + T_{i,j+0.5}) \hat{P}_{ij}^2 + T_{i,j+0.5} \hat{P}_{ij+1}^2 \right] - \frac{1}{\Delta \tau / 2} \hat{P}_{ij} - \delta_{i,j} q_{i,j}. \end{aligned}$$

Здесь $\bar{P}_{i-1,j}, \bar{P}_{i,j}, \bar{P}_{i+1,j}$ – значения функций давления на $r+0.5$ -м временном слое; $\tilde{P}_{i-1,j}, \tilde{P}_{i,j}, \tilde{P}_{i+1,j}$ – приближенные значения функции давления; $\hat{P}_{i,j-1}, \hat{P}_{i,j}, \hat{P}_{i,j+1}$ – значения функции давления на r -м временном слое;

$$T_{i-0.5,j} = \frac{k_{i-0.5,j} h_{i-0.5,j}}{\mu}, \quad T_{i+0.5,j} = \frac{k_{i+0.5,j} h_{i+0.5,j}}{\mu}, \quad T_{i,j-0.5} = \frac{k_{i,j-0.5} h_{i,j-0.5}}{\mu}, \quad T_{i,j+0.5} = \frac{k_{i,j+0.5} h_{i,j+0.5}}{\mu}.$$

Конечно-разностные уравнения с соответствующими краевыми и внутренними условиями решаются методом простой прогонки.

Аналогичным образом аппроксимируются уравнения и условия для $r+1$ -го временного слоя по направлению y .

Итерационный процесс продолжается до выполнения $\max_{i,j} |P_{i,j}^{(s)} - P_{i,j}^{(s-1)}| \leq \varepsilon$, где ε – точность итерационного процесса; s – номер итерации.

На основе разработанной численной модели созданы вычислительный алгоритм и программа и проведен ряд вычислительных экспериментов на ЭВМ для исследования процесса фильтрации нефти и газа (рис. 1-4).

На рис. 1 и 2 приведены результаты вычислительных экспериментов для нефтяных месторождений различной конфигурации. Полученные результаты

могут быть представлены в виде таблиц, визуально в виде контурной графики и в виде графиков убывания давления на разрезе пласта и на скважине.

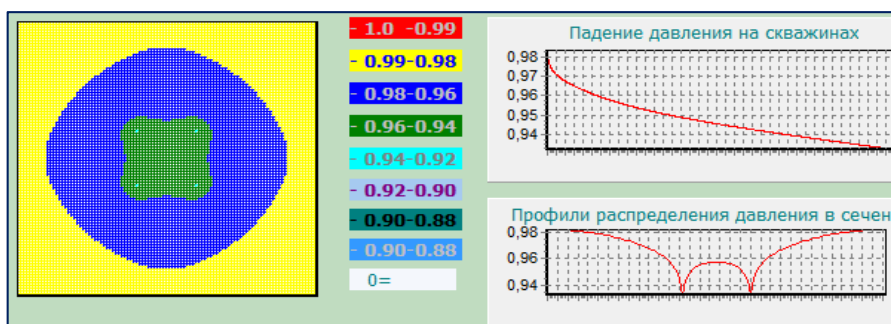


Рис. 1. Результаты расчета для квадратной области, полученные при $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 200 \text{ м}^3 / \text{сут}$

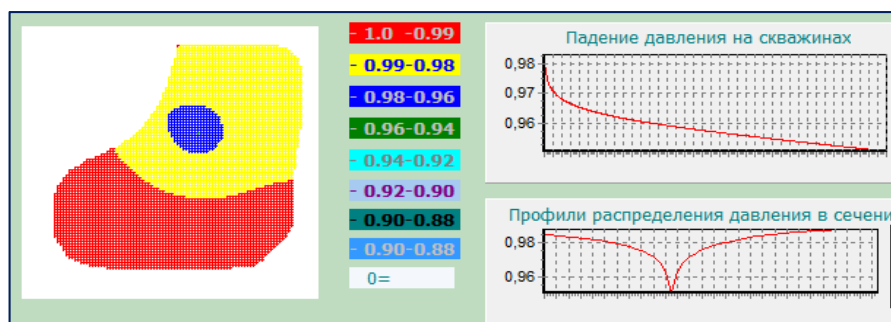


Рис. 2. Результаты расчета для произвольной области, полученные при $q_1 = 200 \text{ м}^3 / \text{сут}$

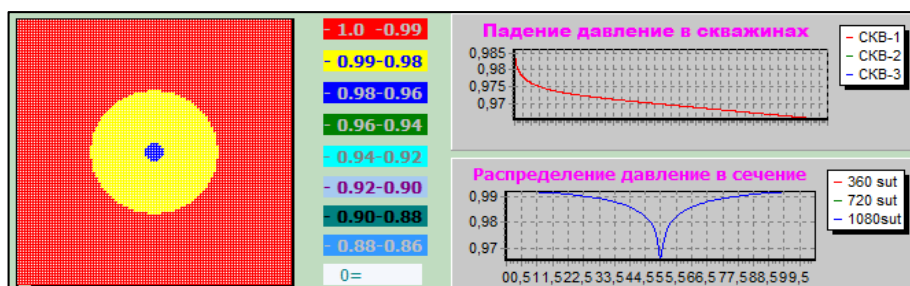


Рис. 3. Изменение давления с учетом осаждения в порах частиц

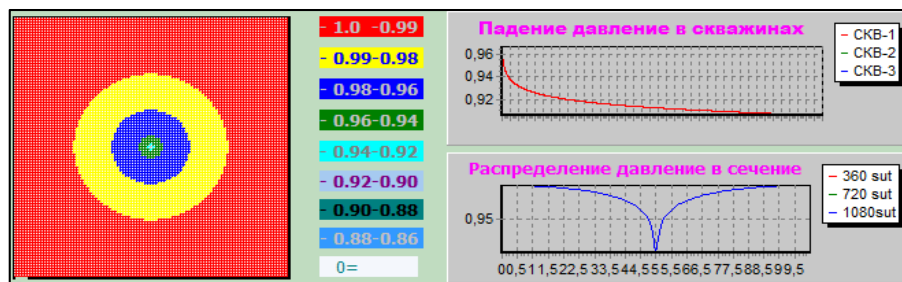


Рис. 4. Изменение давления в пласте без осаждения частиц

Согласно рис. 3 и 4, в начальное время давление падает быстро, а дальше стабилизируется, т.е. замедляется. Осаждение частиц в порах с течением времени приводит к интенсивному падению давления на скважине.

В третьей главе диссертации «Численное моделирование процессов совместной фильтрации несмешивающихся жидкостей в пористой среде» рассмотрены проблемы математического моделирования процесса вытеснения нефти или газа водой в пористой среде и разработки алгоритма

численного решения методом дифференциальной прогонки, основанной на идее дифференциально-разностной схемы.

В математическом отношении такие процессы формулируются как задачи с подвижной границей раздела и представляются краевой задачей следующего вида:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial y} \right) = a\beta_H \frac{\partial P_1}{\partial t} - Q & \text{при } (x, y) \in G_1, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial y} \right) = (1-a_0)\beta_B \frac{\partial P_2}{\partial t} + Q & \text{при } (x, y) \in G_2, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_1 = P_2 = P_H(x, y) & \text{при } t = 0, (x, y) \in G_1 + G_2, \\ q_{H_{i_q}}(t) = \oint_{s_{i_q}} \frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial n} ds & \text{при } i_q = \overline{1, N_q}, \quad q_{B_{i_q}}(t) = \oint_{s_{i_q}} \frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial n} ds & \text{при } (x, y) \in s_{i_q}, i_q = \overline{1, M_q}, \\ \frac{\partial P_2}{\partial n} = 0 & \text{при } (x, y) \in \Gamma_2, \quad P_1(x, y) = P_2(x, y), \quad \frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial n} = \frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial n} & \text{при } (x, y) \in \Gamma_1, \\ \frac{\partial l(x, y, t)}{\partial t} = -\frac{k}{\mu_1 m(a-a_0)} \frac{\partial P_1(x, y, t)}{\partial l}, \quad l(x, y, 0) = \phi(x, y) & \text{при } (x, y) \in \Gamma_1. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь P_1, P_2 – давление в зонах нефти и воды; β_n, β_e – коэффициенты упругоёмкости нефти и воды ($\beta_n = m\beta_{нж} + \beta_c$, $\beta_e = m\beta_{еж} + \beta_c$); $\beta_{нж}, \beta_{еж}$ – коэффициенты сжимаемости нефти и воды; β_c – сжимаемость среды; Γ_1 – контур подвижной границы; Γ_2 – внешний контур; s_{i_q} – контур i_q -й скважины; $q_{H_{i_q}}$ – дебит i_q -й нефтяной скважины; $q_{B_{i_q}}$ – дебит i_q -й водяной скважины; l – вектор скорости, направленный по внутренней нормали к контуру подвижной границы Γ_1 ; a – коэффициент нефтенасыщенности; a_0 – коэффициент остаточной нефтенасыщенности; ϕ – начальная граница раздела нефть-вода.

В краевой задаче (5)-(6), после перехода к безразмерным переменным, для получения дифференциально-разностной задачи применяется неявный метод переменных направлений. На основе этой схемы переход от r -го слоя к $r+1$ -му слою совершается в два этапа с шагом $0.5\Delta\tau$. На первом этапе решается следующая система дифференциально-разностных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left(k_{i,j} \frac{dP_{1j}^{(r+0.5)}(x)}{dx} \right) - \frac{1}{0.5\Delta\tau} P_{1j}^{(r+0.5)}(x) = -\frac{P_{1j}^{(r)}(x)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda_{1y} [k_{i,j} P_{1i,j}^{(r)}], \\ \frac{d}{dy} \left(k_{i,j} \frac{dP_{1i}^{(r+1)}(y)}{dy} \right) - \frac{1}{0.5\Delta\tau} P_{1i}^{(r+1)}(y) = -\frac{P_{1i}^{(r+0.5)}(y)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda_{1x} [k_{i,j} P_{1i,j}^{(r+0.5)}], \\ \frac{d}{dx} \left(k_{i,j} \frac{dP_{2j}^{(r+0.5)}(x)}{dx} \right) - \frac{R^*}{0.5\Delta\tau} P_{2j}^{(r+0.5)}(x) = -\frac{P_{2j}^{(r)}(x)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda_{2y} [k_{i,j} P_{2i,j}^{(r)}], \\ \frac{d}{dy} \left(k_{i,j} \frac{dP_{2i}^{(r+1)}(y)}{dy} \right) - \frac{R^*}{0.5\Delta\tau} P_{2i}^{(r+1)}(y) = -\frac{P_{2i}^{(r+0.5)}(y)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda_{2x} [k_{i,j} P_{2i,j}^{(r+0.5)}]. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь

$$\begin{aligned}\Lambda_{1y} [k_{i,j} P_{1i,j}^{(r)}] &= \frac{k_{i-0.5,j} P_{1i-1,j}^{(r)} - (k_{i-0.5,j} + k_{i+0.5,j}) P_{1i,j}^{(r)} + k_{i+0.5,j} P_{1i+1,j}^{(r)}}{\Delta h^2}, \\ \Lambda_{1x} [k_{i,j} P_{1i,j}^{(r+0.5)}] &= \frac{k_{i,j-0.5} P_{1i,j-1}^{(r+0.5)} - (k_{i,j-0.5} + k_{i,j+0.5}) P_{1i,j}^{(r+0.5)} + k_{i,j+0.5} P_{1i,j+1}^{(r+0.5)}}{\Delta h^2}, \\ \Lambda_{2y} [k_{i,j} P_{2i,j}^{(r)}] &= \frac{k_{i-0.5,j} P_{2i-1,j}^{(r)} - (k_{i-0.5,j} + k_{i+0.5,j}) P_{2i,j}^{(r)} + k_{i+0.5,j} P_{2i+1,j}^{(r)}}{\Delta h^2}, \\ \Lambda_{2x} [k_{i,j} P_{2i,j}^{(r+0.5)}] &= \frac{k_{i,j-0.5} P_{2i,j-1}^{(r+0.5)} - (k_{i,j-0.5} + k_{i,j+0.5}) P_{2i,j}^{(r+0.5)} + k_{i,j+0.5} P_{2i,j+1}^{(r+0.5)}}{\Delta h^2}.\end{aligned}$$

На основе метода дифференциальной прогонки решения дифференциально-разностной системы (7) определяются формулами

$$\begin{aligned}P_{1j}^{(r+0.5)}(x) &= \frac{\gamma_j(x) u_j(x) - \alpha_j(x) w_j(x)}{\alpha_j(x) v_j(x) - \beta_j(x) u_j(x)}, \quad \frac{dP_{1j}^{(r+0.5)}(x)}{dx} = \frac{1}{k_{1j}(x)} \frac{v_j(x) \gamma_j(x) - w_j(x) \beta_j(x)}{[\alpha_j(x) v_j(x) - \beta_j(x) u_j(x)]}, \\ P_{1j}^{(r+1)}(y) &= \frac{\gamma_j(y) u_j(y) - \alpha_j(y) w_j(y)}{\alpha_j(y) v_j(y) - \beta_j(y) u_j(y)}, \quad \frac{dP_{1j}^{(r+1)}(y)}{dy} = \frac{1}{k_{1j}(y)} \frac{v_j(y) \gamma_j(y) - w_j(y) \beta_j(y)}{[\alpha_j(y) v_j(y) - \beta_j(y) u_j(y)]},\end{aligned}$$

где $\alpha_j(x), \beta_j(x), \gamma_j(x)$ и $u_j(x), v_j(x), w_j(x)$ - коэффициенты правой и левой прогонки соответственно и находятся решением следующих задач Коши:

$$\begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} k_{1j}(x) \frac{du_j(x)}{dx} = v_j(x), \quad u_j(0) = 1; \\ \frac{dv_j(x)}{dx} = R_{1j} u_j(x), \quad v_j(0) = 0; \\ \frac{dw_j(x)}{dx} = F_{1j} u_j(x), \quad w_j(0) = 0; \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} k_{1j}(x) \frac{d\alpha_j(x)}{dx} = \beta_j(x), \quad \alpha_j(1) = 1; \\ \frac{d\beta_j(x)}{dx} = R_{1j} \alpha_j(x), \quad \beta_j(1) = 0; \\ \frac{d\gamma_j(x)}{dx} = F_{1j} \alpha_j(x), \quad \gamma_j(1) = 0; \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} k_{1i}(y) \frac{du_i(y)}{dy} = v_i(y), \quad u_i(0) = 1; \\ \frac{dv_i(y)}{dy} = R_{1i} u_i(y), \quad v_i(0) = 0; \\ \frac{dw_i(y)}{dy} = F_{1i} u_i(y), \quad w_i(0) = 0; \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} k_{1i}(y) \frac{d\alpha_i(y)}{dy} = \beta_i(y), \quad \alpha_i(1) = 1; \\ \frac{d\beta_i(y)}{dy} = R_{1i} \alpha_i(y), \quad \beta_i(1) = 0; \\ \frac{d\gamma_i(y)}{dy} = F_{1i} \alpha_i(y), \quad \gamma_i(1) = 0, \end{array} \right.\end{cases}$$

где

$$F_{1j} = -\frac{P_{1j}^{(r)}(x)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda [k_{1i,j} P_{1i,j}^{(r)}] - \delta_{i,j} q_{i,j}, \quad F_{1i} = -\frac{P_{1i}^{(r+0.5)}(y)}{0.5\Delta\tau} - \Lambda [k_{1i,j} P_{1i,j}^{(r+0.5)}], \quad R_{1j} = \frac{1}{0.5\Delta\tau}, \quad R_{1i} = \frac{1}{0.5\Delta\tau}.$$

Для второго уравнения решения $P_{2j}^{(r+0.5)}$ и $P_{2i}^{(r+1)}$ определяются аналогичным способом.

Положение границы раздела нефть-вода определяется по формуле

$$l_{i,j} = \hat{l}_{i,j} - \frac{\Delta\tau k_{i,j}}{m\mu_1} \left[\frac{dP_1}{dx} \cos \bar{\alpha} + \frac{dP_1}{dy} \cos \bar{\beta} \right].$$

Здесь $l_{i,j}$ – вектор скорости, направленный по внутренней нормали на границе раздела $l_{i,j}^{(0)} = \hat{l}_{i,j} = l(x, y, t_0)$; $\bar{\alpha}$ – угол между нормалью и осью ox ; $\bar{\beta}$ – угол между нормалью и осью oy : $\bar{\beta} = \frac{3}{2}\pi + \bar{\alpha}$.

Математическая модель процесса нестационарной фильтрации с подвижной границей раздела газ-вода имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1^2}{\partial y} \right) = 2am \frac{\partial P_1}{\partial t} - Q \quad \text{при } (x, y) \in G_1, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2^2}{\partial y} \right) = (1-a_0) \beta_B \frac{\partial P_2}{\partial t} + Q \quad \text{при } (x, y) \in G_2, \\ P_1 = P_2 = \bar{P}(x, y) \quad \text{при } t = 0, \quad (x, y) \in G_1 + G_2, \\ q_{\Gamma_{i_q}}(t) = \oint_{s_{i_q}} \frac{k}{\mu_1} \frac{P_1}{P_{ar}} \frac{\partial P_1}{\partial n} ds \quad \text{при } i_q = \overline{1, N_q}, \quad q_{B_{i_q}}(t) = \oint_{s_{i_q}} \frac{k}{\mu_2} \frac{P_2}{P_{ar}} \frac{\partial P_2}{\partial n} ds \quad \text{при } (x, y) \in s_{i_q}, i_q = \overline{1, M_q}, \\ \frac{\partial P_2}{\partial n} = 0 \quad \text{при } (x, y) \in \Gamma_2, \quad P_1(x, y) = P_2(x, y), \quad \frac{k}{\mu_1} \frac{\partial P_1}{\partial n} = \frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_2}{\partial n} \quad \text{при } (x, y) \in \Gamma_1, \\ \frac{\partial l}{\partial t} = - \frac{k_1}{\mu_1 m (a - a_0)} \frac{\partial P_1}{\partial l}; \quad l(x, y, 0) = \phi(x, y) \quad \text{при } (x, y) \in \Gamma_1. \end{array} \right.$$

Так как уравнение сохранения массы содержит нелинейные члены с P^2 , то используются методы квазилинеаризации и итерации (см. главу II).

Проведены вычислительные эксперименты по исследованию процессов совместной фильтрации «нефть-вода» и «газ-вода» в пористой среде.

На рис. 5 пластовое давление искусственно поддерживается с помощью трех нагнетательных скважин в левой части прямоугольного пласта (блочное нагнетание воды). Здесь в центре расчетной области расположена одна работающая скважина.



Рис. 5. Поддержка давления в пласте с блоковым заводнением

Из рисунка видно, что пластовое давление справа от центра в некотором интервале остается практически постоянным, затем резко падает и достигает своих минимальных значений в точке, где расположена эксплуатационная скважина. С увеличением времени увеличивается падение давления в правой части (эта часть на рисунке отражена черным цветом). Со временем этот процесс нормализуется, т.е. наблюдается увеличение давления и в левой части пласта.

В четвертой главе диссертации «**Моделирование процессов фильтрации нефти и газа в многопластовых пористых средах**»

разработана математическая модель фильтрации жидкостей в многослойных пористых средах и получено аналитически-приближенное решение задач. Разработаны численные модели и вычислительные алгоритмы задачи фильтрации нефти и газа в динамически связанных двухслойных пористых средах.

Трехмерная математическая модель процесса многослойной фильтрации жидкостей описывается следующими уравнениями и граничными условиями:

$$\begin{cases} \frac{1}{a_1} \frac{\partial P_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_1}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_1(z) \frac{\partial P_1}{\partial z} \right), \\ \frac{1}{a_2} \frac{\partial P_2}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_2}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_2(z) \frac{\partial P_2}{\partial z} \right) - \delta Q, \\ \frac{1}{a_3} \frac{\partial P_3}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_3}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_3(z) \frac{\partial P_3}{\partial z} \right); \\ \left. \begin{aligned} P_s|_{t=0} &= P_{0,s}(x, y, z), \quad P_s|_{x=0} = \varphi_{1,s}(y, z, t), \quad P_s|_{x=L_1} = \varphi_{2,s}(L_1, y, z, t), \quad P_s|_{y=0} = \psi_{1,s}(x, z, t), \\ P_s|_{y=L_2} &= \psi_{2,s}(x, L_2, z, t), \quad P_s|_{z=0} = \zeta_{1,s}(x, y, t), \quad P_s|_{z=L_3} = \zeta_{2,s}(x, y, L_3, t). \end{aligned} \right\}$$

Отсюда видно, что на границах между пластами должны выполняться следующие условия сопряжения:

$$P_s|_{z=m_{s+1}} = P_{s+1}|_{z=m_{s+1}}, \quad k_s \frac{\partial P_s}{\partial z} \Big|_{z=m_{s+1}} = k_{s+1} \frac{\partial P_{s+1}}{\partial z} \Big|_{z=m_{s+1}},$$

где $s=1,2,3$ – номера пластов; P_s – давление в s -м пласте; $k(z)_s$ – коэффициент фильтрации s -го пласта; a_s – коэффициент пьезопроводности s -го пласта; $\varphi_{1,s}(y, z, t)$, $\varphi_{2,s}(L_1, y, z, t)$, $\psi_{1,s}(x, z, t)$, $\psi_{2,s}(x, L_2, z, t)$, $\zeta_{1,s}(x, y, t)$, $\zeta_{2,s}(x, y, L_3, t)$ – заданные непрерывные функции на границе области фильтрации; m_{s+1} – точки разделения на пласте; Q – дебит в скважинах, $Q = \sum_{i=1}^r \delta q_i(t)$.

На основе конечно-разностного метода и метода дифференциальной прогонки получено приближенно-аналитическое решение задачи фильтрации жидкостей в многопластовой пористой среде.

При разработке многопластовых нефтяных месторождений необходимо учитывать гидродинамическое взаимодействие пластов. Если пласты однородны по свойствам, то задачу можно представить в одно- или двумерной постановке. В частности, задачу фильтрации газа в двухпластовых системах при наличии слабопроницаемой перемычки в двумерном случае можно представить системой уравнений параболического типа с начальными и граничными условиями:

$$\begin{cases}
\frac{\partial}{\partial x} \left[k_1(x,y) h_1(x,y) \frac{\partial P_1}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_1(x,y) h_1(x,y) \frac{\partial P_1}{\partial y} \right] = \\
= \mu \beta h_1(x,y) \frac{\partial P_1}{\partial t} - \frac{k_{\Pi}(x,y)}{h_{\Pi}(x,y)} (P_2 - P_1) \quad \text{при } (x,y) \in G_1, \\
\frac{\partial}{\partial x} \left[k_2(x,y) h_2(x,y) \frac{\partial P_2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_2(x,y) h_2(x,y) \frac{\partial P_2}{\partial y} \right] = \\
= \mu \beta h_2(x,y) \frac{\partial P_2}{\partial t} + \frac{k_{\Pi}(x,y)}{h_{\Pi}(x,y)} (P_2 - P_1) - Q \quad \text{при } (x,y) \in G_2; \\
P_1(x,y) = P_{1H}(x,y), \quad P_2(x,y) = P_{2H}(x,y) \quad \text{при } t = 0, \\
-k_1 h_1 \frac{\partial P_1}{\partial n} = \lambda \alpha (P_A - P_1) \quad \text{при } (x,y) \in \Gamma_1, \quad -k_2 h_2 \frac{\partial P_2}{\partial n} = \lambda \alpha (P_B - P_2) \quad \text{при } (x,y) \in \Gamma_2, \\
\oint_{s_{i_q}} \frac{k_2 h_2}{\mu} \frac{\partial P_2}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t) \quad \text{при } (x,y) \in s_{i_q}, \quad i_q = 1, 2, \dots
\end{cases} \quad (8)$$

Здесь P_1, P_2 – давление в нижнем и верхнем пластах; P_{1H}, P_{2H} – начальные пластовые давления; P_A, P_B – граничные давления, соответственно в нижнем и верхнем пластах; k_1, k_2 – проницаемости пластов; k_{Π} – проницаемость перемычки; h_1, h_2 – толщины нижнего и верхнего пластов; h_{Π} – толщина слабопроницаемой перемычки; μ – вязкость нефти; β – эластичность пласта; $q(t)$ – дебит скважины в нижнем пласте.

Перейдем в граничной задаче (8)-(9) к безразмерным переменным и решим ее конечно-разностным методом. Система конечно-разностных уравнений для (8) для первой половины временного шага имеет следующий вид:

$$\begin{cases}
(3k_1 h_1 - 2h\lambda\alpha) P_{10,j} - 4k_1 h_1 P_{11,j} + k_1 h_1 P_{12,j} = 2h\lambda\alpha P_A, \\
a_i P_{1i-1,j} - b_i P_{1i,j} + c_i P_{1i+1,j} + d_i P_{2i,j} = -f_i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \\
(3k_1 h_1 - 2h\lambda\alpha) P_{1N,j} + 4k_1 h_1 P_{1N-1,j} - k_1 h_1 P_{1N-2,j} = -2h\lambda\alpha P_A, \\
(3k_2 h_2 - 2h\lambda\alpha) P_{20,j} - 4k_2 h_2 P_{21,j} + k_2 h_2 P_{22,j} = 2h\lambda\alpha P_A, \\
a'_i P_{2i-1,j} - b'_i P_{2i,j} + c'_i P_{2i+1,j} + d'_i P_{1i,j} = -f'_i, \quad j = 1, 2, \dots, M-1, \\
(3k_2 h_2 - 2h\lambda\alpha) P_{2M,j} + 4k_2 h_2 P_{2M-1,j} - k_2 h_2 P_{2M-2,j} = -2h\lambda\alpha P_A.
\end{cases}$$

Решения определяются следующими рекуррентными формулами:

$$P_{1i,j} = A_i P_{1i+1,j} + B_i P_{2i+1,j} + C_i, \quad P_{2i,j} = A'_i P_{2i+1,j} + B'_i P_{1i+1,j} + C'_i \quad \text{при } i=0,1,2,\dots,N-1; \\
P_{1N,j} = (S_2 S'_3 - S_3 S'_1) / (S_1 S'_1 - S_2 S'_2), \quad P_{2N,j} = (S_3 S'_2 - S_1 S'_3) / (S_1 S'_1 - S_2 S'_2),$$

где

$$S_1 = [(3a_{N-1} - c_{N-1}) - (4a_{N-1} - b_{N-1})A_{N-1} - d_{N-1}B'_{N-1}], \\
S_2 = [-(4a_{N-1} - b_{N-1})B_{N-1} - d_{N-1}A'_{N-1}], \quad S_3 = [f_{N-1} + d_{N-1}C'_{N-1} + (4a_{N-1} - b_{N-1})C'_{N-1}],$$

$$S'_1 = \left[(3a'_{N-1} - c'_{N-1}) - (4a'_{N-1} - b'_{N-1})A'_{N-1} - d'_{N-1}B_{N-1} \right],$$

$$S'_2 = \left[-(4a'_{N-1} - b'_{N-1})B'_{N-1} - d'_{N-1}A_{N-1} \right], \quad S'_3 = \left[f'_{N-1} + d'_{N-1}C_{N-1} + (4a'_{N-1} - b'_{N-1})C_{N-1} \right].$$

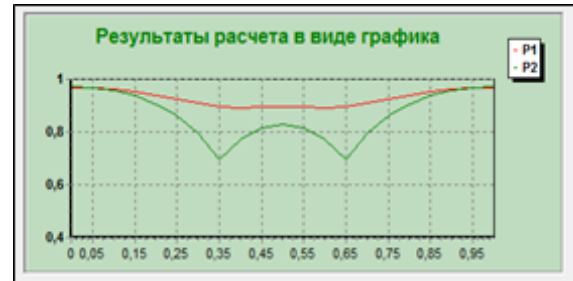
Вычисления для второй половины r -го слоя реализуются аналогично.

Вычислительные эксперименты проведены для значений вязкости $\mu = 4 \text{ сПз}$ (рис. 6) и $\mu = 8 \text{ сПз}$ (рис. 7).



$k_1=0.05 \text{ Д}, k_2=0.1 \text{ Д}, \mu=4 \text{ сПз},$
 $P_1=P_2=200 \text{ атм.}$

Рис. 6. Результаты расчетов на 360
суток



$k_1=0.05 \text{ Д}, k_2=0.1 \text{ Д}, \mu=8 \text{ сПз},$
 $P_1=P_2=200 \text{ атм.}$

Рис. 7. Расчеты результатов на 360
суток

Согласно кривым на рисунках, в работающей скважине наблюдается быстрое падение давления; падение давления на первом пласте зависит от вязкости и коэффициента проницаемости перемычки.

Задача фильтрации газа для двухслойных пористых сред со слабопроницаемой перемычкой описывается следующей краевой задачей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left[k_1(x, y) h_1(x, y) \frac{\partial P_1^2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_1(x, y) h_1(x, y) \frac{\partial P_1^2}{\partial y} \right] = \\ = 2\mu\alpha_1 m_1 h_1(x, y) \frac{\partial P_1}{\partial t} - \frac{k_{п1}(x, y)}{h_{п1}(x, y)} (P_2^2 - P_1^2) \text{ при } (x, y) \in G_1, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[k_2(x, y) h_2(x, y) \frac{\partial P_2^2}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_2(x, y) h_2(x, y) \frac{\partial P_2^2}{\partial y} \right] = \\ = 2\mu\alpha_2 m_2 h_2(x, y) \frac{\partial P_2}{\partial t} + \frac{k_{п2}(x, y)}{h_{п2}(x, y)} (P_2^2 - P_1^2) - Q \text{ при } (x, y) \in G_2, \\ P_1(x, y) = P_{1H}(x, y), P_2(x, y) = P_{2H}(x, y) \text{ при } t = 0, \\ - \frac{k_1 h_1}{\mu} \frac{\partial P_1}{\partial n} = \alpha (P_A - P_1) \text{ при } (x, y) \in \Gamma_1, \\ - \frac{k_2 h_2}{\mu} \frac{\partial P_2}{\partial n} = \alpha (P_B - P_2) \text{ при } (x, y) \in \Gamma_2, \\ \oint_{s_{i_q}} \frac{k_i h_i}{\mu} \frac{P}{P_{am}} \frac{\partial P_i}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t) \text{ при } (x, y) \in s_{i_q}, i_q = 1, 2, \dots \end{array} \right.$$

Для решения задачи использованы метод переменных направлений, квазилинеаризация и метод итерации. Итерационный процесс продолжается до выполнения условия $\max_{i,j} |P_{i,j}^{(s)} - P_{i,j}^{(s-1)}| \leq \varepsilon$.

Вычислительные эксперименты проводились для различных значений коэффициентов вязкости и проницаемости.

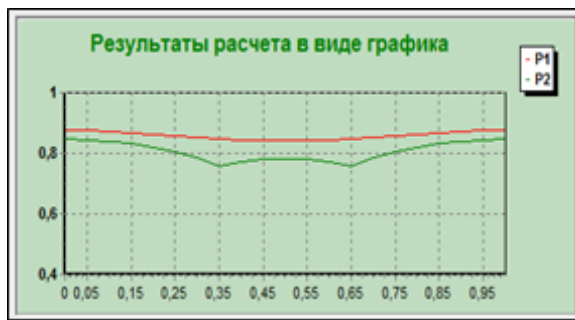


Рис. 8. Результаты расчетов при $k_1=0.01$ Д, $k_2=0.02$ Д, $k_n=0.0000001$ Д, $\mu=0.01$ сПз

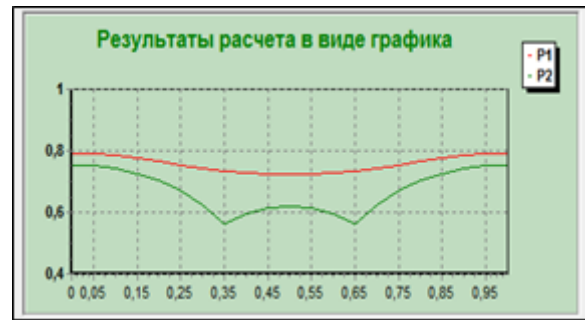


Рис. 9. Результаты расчетов при $k_1=0.01$ Д, $k_2=0.02$ Д, $k_n=0.0000001$ Д, $\mu=0.02$ сПз

Согласно рис. 8-9, увеличение коэффициента вязкости газа приводит к медленному распространению давления, а увеличение коэффициента проницаемости - к интенсивному распространению давления.

В пятой главе диссертации «**Программный комплекс для определения основных показателей нефтяных и газовых месторождений**» описывается программный комплекс, разработанный для расчета основных показателей работы месторождений нефти и газа и визуализации результатов исследований.

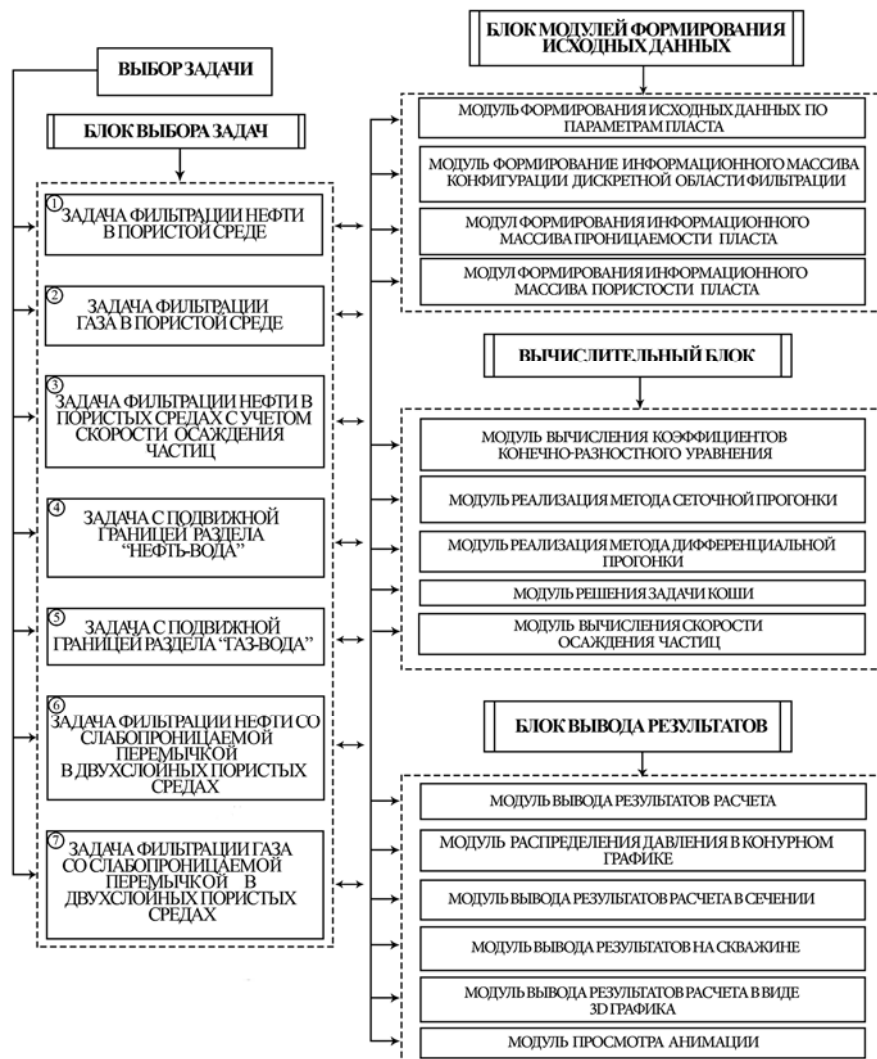


Рис. 10. Функциональная схема программного комплекса

На рис. 10 приведена функциональная схема разработанного программного комплекса.

В программном комплексе, для облегчения анализа полученных результатов, данные визуализируются на основе диалога, в виде таблицы и графика на экране компьютера.

Программное обеспечение «Расчет основных показателей работы нефтяных месторождений» можно применить при анализе работы нефтяных месторождений, их предсказании и проектировании.

Программное обеспечение состоит из следующих блоков:

Ввод начальных данных: время работы, начальное давление пласта, шаг по времени, коэффициент проницаемости и пористости пласта, вязкость нефти, длина и мощность пласта, а также дебит и координаты скважины.

Результаты выводятся в следующем виде: распространение давления в виде контуров графиков, понижение давления в скважине в промежутке времени; профиль распределения давления в разрезе.

Выбор конфигурации среды фильтрации: окружность, четырехугольник, эллипс, многоугольник, произвольная.

Просмотр информационного массива среды фильтрации и конфигурации проницаемости пласта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе на тему «Математические модели, численные методы и комплексы программ для исследования процессов фильтрации жидкостей и газов», сводятся к следующим выводам:

1. Сформированы информационные модели, учитывающие строение нефтяных и газовых залежей, свойства неоднородности фильтрационных потоков используемых при построении математических моделей нестационарных процессов фильтрации. Данные модели помогли построить математические модели нестационарных процессов фильтрации.

2. Разработаны математические модели нестационарных процессов фильтрации нефти и газа в областях со сложной конфигурацией с учетом осаждения мелкодисперсных частиц в пористых средах, вычислительные алгоритмы решения двумерных краевых задач на основе метода переменных направлений. Математическая и численная модели служат для описания процессов фильтрации в соответствии с законами теории фильтрации жидкостей и газов, учитывающей осаждение мелкодисперсных частиц в пористых средах, оказывающих сильное влияние на изменения коэффициента проницаемости и пористости пласта.

3. Усовершенствована математическая модель нестационарных процессов фильтрации с подвижными границами раздела нефть-вода и газ-вода при искусственном поддержании пластового давления. Данная модель

служит для искусственного поддержания пластового давления и описания процесса изменения показателей с течением времени за счет закачки воды в нефте- и газоносный пласты.

4. Разработаны эффективные вычислительные алгоритмы на основе совместного использования методы переменных направлений и дифференциальной прогонки для решения задач типа Стефана при совместной фильтрации нефть-вода и газ-вода. Они способствовали изучению процесса фильтрации в условиях законтурного, приконтурного и блокового режимов заводнения при приемлемости межфазных границ нефть-вода и газ-вода.

5. Исследовано влияние вязкости жидкостей и газа, проницаемости пласта и расходов скважин на водонапорный режим разработки нефтяных и газовых месторождений. Установлено, что увеличение вязкости нефти и газа приводит к повышению значения давления на границе раздела и медленному распределению давления в водоносной зоне.

6. Разработан приближенно-аналитический метод решения задач трехмерной фильтрации на основе совместного применения конечно-разностного и дифференциально-разностного метода, в результате чего удалось получить приближенно-аналитическое решение задач фильтрации сжимаемой и несжимаемой сред в рамках использованных неявных по времени схем аппроксимации.

7. Разработаны математические модели и вычислительные алгоритмы расчета фильтрации нефти и газа в динамически взаимосвязанных двухслойных пористых средах со слабопроницаемой перемычкой, которые позволили исследовать особенности взаимодействия продуктивных пластов.

8. Разработанные численные методы обеспечивают точность аппроксимации $O(\tau + h^2)$, реализуют метод квазилинеаризации при решении задач фильтрации газа и информационные массивы о пласте и скважинах. В результате достигается быстрая сходимость итерационного процесса при решении нелинейных задач и в целом обеспечивается многократное сокращение времени расчета.

9. Разработан программный комплекс с удобным интерфейсом, позволяющий вести расчет: для нефти и природного газа; для прямоугольной, круглой, эллиптической и произвольной формы области расчета при заданной мощности пласта; учитывать постоянность и переменность фильтрационных показателей пласта, произвольные количества закачивающих и откачивающих скважин, их координаты и дебиты.

10. Разработанные в рамках диссертационного исследования математические модели, численные методы, алгоритмы и программные продукты, а также численные результаты внедрены в ООО «Муборакнефтьгаз», АО «Джаркурганнефть», ООО «Шуртаннефтьгаз», ООО

«Касансайская нефтегазовая экспедиция» и ГП «Институт ГидроИНГео». В результате были достигнуты сокращение времени расчета основных показателей разработки месторождений в 8-10 раз и 85%-ная точность при сравнении с экспериментальными данными.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.27.06.2017.T.07.01 AT TASHKENT UNIVERSITY OF
INFORMATION TECHNOLOGIES**

TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES

NAZIROVA ELMIRA SHODMONOVNA

**MATHEMATICAL MODELS, NUMERICAL METHODS AND A
COMPLEX PROGRAM FOR RESEARCH PROCESSES OF FILTRATION
OF LIQUIDS AND GASES**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes

**ABSTRACT OF THE DOCTORAL (DSc)
DISSERTATION OF TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent-2019

The theme of doctoral (DSc) dissertation was registered with the number of B2017.2.DSc/T120 at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan.

The dissertation has been prepared at Scientific and Innovation Center of Information and Communication Technologies at the Tashkent University of Information Technologies.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website www.tuit.uz and on the website of «Ziyonet» Information and educational portal www.ziyonet.uz.

Scientific adviser: **Ravshanov Normahmad**
doctor of technical sciences, professor

Official opponents: **Aripov Mirsaid**
doctor of technical sciences, professor
Khujayev Ismatulla Kushaevich
doctor of technical sciences, senior scientific worker
Khabibullaev Ibrokhim Khabibullaevich
doctor of technical sciences, professor

Leading organization: **Samarkand State University**

The defense will take place “_____” _____ 2019 at _____ on the meeting of Scientific council No. DSc.27.06.2017.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: tuit@tuit.uz).

The dissertation is available at the Information Resource Centre of the Tashkent University of Information Technologies (is registered under No. _____). (Address: 100202, Tashkent city, Amir Temur street, 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52).

Abstract of dissertation sent out on “_____” _____ 2019 y.
(mailing report No. ____ on “_____” _____ 2019 y.).

R.Kh.Khamdamov
Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

F.M.Nuraliev
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, docent

A.Polatov
Chairman of the academic seminar under the
scientific council awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of the dissertation of doctor of science (DSc))

The aim of research. Creating mathematical models, effective computing algorithms and development of their complex software to identify key performance indicators for multilayer oil and gas fields.

The objects of research as in the one, two, and three-layered porous environments, the processes of non-stationar distribution of gas and fluid are discussed.

Scientific novelty of research is as follows:

the mathematical model of non-linear filtration processes of oil, gas and liquids, taking into account the dip in the porous environments, and the computational algorithms for the solution of the boundary problem;

mathematical models of oil and gas neutralizable filtration processes in porous environments, taking into account the complex configuration of filtration areas and hydrodynamic parameters of the layer;

mathematical models of non-linear filtering processes of "oil-water" and "gas-water", taking into account the limits of the artificial increase of pressure on the basis of the theory of hydrodynamic movement of liquids and gas, to the oil and gas layers;

developed effective algorithms for solving Stephen boundary-value filtration of oil-water and gas-water on the basis of improved mathematical models;

a mathematical model of fluid filtration processes in multilayered porous environments was developed under the law of the theory of hydrodynamic movement of liquids and gases;

theoretical and analytical solution was made using differential equations and differential equations of fluid filtration problem in multi-layer porous environments;

based on the models of oil and gas filtration in two-layer environments, effective algorithms for identifying key performance indicators of oil and gas have been developed;

a numerical model of oil and gas filtration issues have been developed in a dual layer of dynamic relationships.

Implementation of research results. On the basis of mathematical models of calculation of key performance indicators of oil and gas deposits, calculation algorithms and complex software, taking into account the dynamic relationship between the hydrodynamic parameters of the layers are obtained:

Maintaining the calculation of oil and gas fields' core performance indicators and forecasting of oil and gas operations, "Calculating the main indicators of gas field development", "Mathematical model of oil filtration processes in porous media", "Dynamic connection of gas fields in dual layer", "Development of software environment, which calculates the main indicators of recycling", "Programming environment for the solution of the problem of oil filtration in two-layer environments " it was concluded that the SUE «UNICON.UZ» have used. (SUE «UNICON.UZ» of December 17, 2018). As a result, based on the software complexes created by the modeling of the basic oil and gas deposits modeling methods, it was possible to detect the appearance of fine particles in complex configurations, the artificial lifting of the

pressure through the water to the layer and the change of the boundary, the time variation of the pressure in the multilayered media with the permeable layer;

mathematical model, computational algorithm and software set for the solution of two dimensional processes of non-standard filtration processes of liquids, taking into account the non-standard filtration of liquids and gases in porous environments, as well as fine particles movement in porous environments. The Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan from November 8, 2018, No. 33-8/8368). As a result of the research, the results of the developed software have been compared with the results obtained in the experimental process, and the closeness of the results was 15%, which allowed automating the process of calculating key performance indicators for oil and gas fields, as well as shortening the estimated timeframe 8-10 times;

The software "The Computer Model of Oil and Gas Processing Processes", developed on the basis of the numerical solution algorithms of nonlinear moving liquids in the field of filtration, has been put into practice in the development of Surkhandarya region's Jarkurganneft Joint Stock Company (November 8, 2018, The Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan 33-8/8368). As a result of scientific research it has been possible to increase the efficiency of the layer by up to 10% by means of water extraction into oil layers;

The main indicators of forecasting and calculation of the main indicators in the development of heavy-permeable oil and gas fields with dynamic communication are introduced into the operation of the "Kasansoy" Oil and Gas Exploration Expedition LLC in the Republic of Uzbekistan (Data Sheet 33-8/8368 of 8 November 2018). As a result of scientific research, oil productivity increased up to 8-10%;

the mathematical and numerical model of gas filtration processes and the software package in two-layer porous environments with poor permeable layers were put into practice in "Shortanneftegaz" LLC (Reference information 33-8/8368 of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan dated November 8, 2018). As a result of the scientific research, the multilayer gas filtration process automated and the process of automation and calculation, allowing the productivity of the sheet to be reduced by 8-10% and the wells to 8%;

the mathematical model of non-linear filtering processes of oil, gas and fluids, their numerical computing algorithms and software set-up has been incorporated into the GIDROINGEO Institute's state-of-the-art practice, taking into account the sinking of small particles in the porous environment (The Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic of Uzbekistan of November 8, 2018, 8/8368). As a result of the research, the layer has increased the efficiency of oil extraction up to 9-10%.

The volume and structure of the dissertation. The dissertation consists of five chapters, conclusion, list of references, applications. The volume of dissertation is 197 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; Ipart)

1. Назирова Э.Ш. Модульный анализ алгоритма решения задач фильтрации многофазных жидкостей в пористых средах // Узб. журнал «Проблемы информатики и энергетики». – Ташкент, 2014. - № 5. - С. 48-52 (05.00.00; № 5).

2. Хужаев Ж.И., Назирова Э.Ш. Бир ўлчовли қотиш жараёнини ҳисоблашнинг фронтни тутиш методига асосланган сонли алгоритми ва унга доир ҳисоб тажрибаси // TATU xabarları. – Тошкент, 2015. - № 3 (35). - Б. 120-126 (05.00.00; № 31).

3. Ne'matov A., Nazirova E.Sh. Kompyuterda neft konlarining asosiy ko'rsatkichlarini hisoblash algoritmi va dasturiy ta'minotini yaratish // Hisoblash va amaliy matematika muammolari. - Tashkent, 2015. - № 2. – В. 12-18 (05.00.00; № 23).

4. Хужаев Ж.И., Назирова Э.Ш. Аппроксимация инсоляции в тригонометрические ряды с учетом условий земной атмосферы // Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2016. - № 1 (37). - С. 86-90 (05.00.00; № 31).

5. Nazirova E.Sh. Mathematical modeling of filtration problems three phase fluid in porous medium // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж: Научная книга, 2018. - № 1(109). - С. 31-40 (05.00.00; № 43).

6. Назирова Э.Ш. Компьютерное моделирование процессов разработки нефтяных месторождений и визуализации результатов вычислительного эксперимента // Вестник ТУИТ. - Ташкент, 2018. - № 1(45). - С. 95-108 (05.00.00; № 31).

7. Назирова Э.Ш., Неъматов А. Численное моделирование процесса фильтрации газа в многослойных пористых средах // Там же. - С. 77-88 (05.00.00; № 31).

8. Равшанов Н., Назирова Э.Ш. Математическая модель и алгоритм решения задачи фильтрации нефти в двухпластовых пористых средах // Проблемы вычислительной и прикладной математики. - Ташкент, 2018. № 4(16). - С. 33-46 (05.00.00; № 23).

9. Назирова Э.Ш. Численное моделирование процессов фильтрации нефти в многопластовых пористых средах при динамической связи между пластами // Потомки Мухаммеда Аль-Хорезми. - Ташкент, 2018. - № 4(6). - С. 10-14 (05.00.00; № 10).

10. Назирова Э.Ш. Моделирование процесса фильтрации жидкости в многослойной пористой среде и приближённо-аналитическое решение задачи // Проблемы вычислительной и прикладной математики. - Ташкент, 2018. - № 6(18). - С. 124-134 (05.00.00; № 23).

11. Ravshanov N., Nazirova E. Numerical simulation of filtration processes of strongly polluted oil in a porous medium // Ponte. – 2018. – vol. 74. – № 11/1. – pp. 107-116 (№ 41), SCImago, IF=0,15.

II бўлим (II часть; II part)

1. Неъматов А., Назирова Э.Ш. Икки ўлчовли параболлик типдаги дифференциал тенгламага қўйилган чегаравий масалани ечишнинг сонли усули // Математика, математик моделлаштириш ва ахборот технологияларининг долзарб масалалари: Республика илмий конференцияси материаллари тўплами. 2012 йил, 21-22 ноябрь. - Термиз, 2012. – Б. 120-124.

2. Назирова Э.Ш. Структуры базы данных для решения задач фильтрации многофазных жидкостей в пористой среде // Ахборот технологиялари ва телекоммуникация тизимларини самарали ривожлантириш истиқболлари: Республика илмий-техник конференцияси. Маърузалар тўплами. 1 қисм. 2014 йил, 13-14 март. - Тошкент, 2014. – Б. 247-249.

3. Назирова Э.Ш., Содиков Р.Т. Построение математических зависимостей для некоторых параметров пластовой среды // Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хоразми 2014: Труды конференции. Т.1. 15-17 сентября 2014. - Самарканд, 2014. - С. 132-133.

4. Неъматов А., Назирова Э.Ш. Параболлик типдаги икки ўлчовли чегаравий масалани сонли усулда ечиш алгоритми // ТАТУ хабарлари. - Тошкент, 2014. - № 2. - Б. 97-100.

5. Nematov A., Nazirova E.Sh., Sodiqov R.T. Explicit/implicit scheme of numerical decision marginal problems non-stationary three-phase filtration // Perspectives for the development of information technologies ITPA-2014. 4-5-november, 2014. – Tashkent, 2014. - pp. 260-264.

6. Неъматов А., Назирова Э.Ш. Дирихле масаласини ечишнинг дифференциал айирмали усули // Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграциясида ахборот-коммуникация технологияларини қўллашнинг ҳозирги замон масалалари: Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами. 3-қисм. – Нукус, 2015. – Б. 400-404.

7. Неъматов А., Назирова Э.Ш., Содиков Р. Ғовак муҳитда нефтнинг филтрланиш жараёнининг чегарий масаласини сонли моделлаштириш // Radiotexnika, telekommunikatsiya va axborot texnologiyalari: muammolari va kelajak rivoji: Xalqaro ilmiy-texnik konferensiya maqolalar to'plami. I-tom. 2015-yil, 21-22 may. – Toshkent, 2015. – Б. 8-11.

8. Хужаев Ж.И., Назирова Э.Ш. Математическое и информационное обеспечения расчета процесса сушки пористого тела с учетом конвекции // Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении: Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции. 7-8 сентября 2015. - Ташкент, 2015. - С. 247-254.

9. Неъматов А., Назирова Э.Ш., Қулмуратов М. Параболлик типли дифференциал тенгламага қўйилган чегаравий масалани алгоритми ва дастури // Modern problems of applied mathematics and information technology – Al-Khorezmīy 2016: V International conference. Transactions of the conference. - vol. 2. 9-10 november, 2016. - Bukhara, 2016. - pp. 107-109.

10. Неъматов А., Назирова Э.Ш., Содиков Р.Т. Хусусий ҳосилали дифференциал тенгламаларни Mathcad математик тизимда ечиш // Modern

problems of applied mathematics and information technology –Al-Khorezmiy 2016: V International conference. Transactions of the conference. – vol. 2. 9-10 november, 2016. - Bukhara, 2016. - pp. 105-107.

11. Неъматов А., Назирова Э.Ш. Численное моделирование процесса фильтрации газа в пористых средах // Международный академический вестник. ISSN 2312-5519/ № 1(13). - 2016. - С. 52-56.

12. Неъматов А., Назирова Э.Ш. Численное моделирование двумерной задачи фильтрации нефти в пористой среде методом дифференциальной прогонки // XVI Международная научно-методическая конференция: Тез.докл. Секция 1. Проблемы информатики как наука. 11-12 февраля 2016. – Воронеж, 2016. - С. 114-117.

13. Назирова Э.Ш., Содиков Р.Т. Mathcad тизимда Пуассон тенгламасини ечиш ва унинг визуал графикаси // Ахборот ва телекоммуникация муаммолари: Республика илмий-техник конференциясининг маърузалар тўплами. 2-қисм. – 2016, 10-11 март. – Тошкент, 2016. – Б. 4-5.

14. Хужаев Ж.И., Назирова Э.Ш. Собственные значения и векторы матрицы перехода из параболического уравнения к конечно разностным уравнениям при решении задачи Дирихле // Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении: Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции. 5-6 сентября 2017. - Ташкент, 2017. - С. 205-210.

15. Назирова Э.Ш., Содиков Р.Т., Бахриддинов А.Қ. Икки ўлчовли параболик тенгламаларни сонли ечиш натижаларини Matlab тизимида визуаллаштириш дастурини яратиш // Иқтисодиётнинг реал тармоқларини инновацион ривожланишида ахборот–коммуникация технологияларининг аҳамияти: Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами. 1-қисм. – Тошкент, 2017. – Б. 332-334.

16. Неъматов А., Назирова Э.Ш. Методы численного расчета основных показателей разработки двухпластовых месторождений нефти // International conference on importance of information-communication technologies in innovative development of sectors of economy. 5-6 april, 2018. - Tashkent, 2018. - pp. 292-295.

17. Равшанов Н., Назирова Э.Ш. Численное решение двумерных задач фильтрации нефти в двухпластовых пористых средах // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2018: Материалы Международной научно-технической конференции. 30 марта 2018. Т.1. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. - С. 152-155.

18. Nazirova E.Sh. Numerical solution for oil filtration with the particular gel of particles in a porous medium // Abstracts of the VI International scientific conference «Modern problems of the applied mathematics and information technology – Al-Khorezmiy 2018». NUU. 13-15 september, 2018. - Tashkent, 2018. - pp. 99-100.

19. Назирова Э.Ш., Неъматов А., Улугбеков С. Модели, алгоритмы и программный комплекс для графического представления распределения давления нефти в пористых средах // Актуальные проблемы математического моделирования, алгоритмизации и программирования: Материалы

Республиканской научно-практической конференции. 7-18 сентября 2018. - Ташкент, 2018. - С. 178-182.

20. Назирова Э.Ш., Содиков Р.Т., Исмаилов Ш. Гидродинамик алоқадаги икки қатламли ғовак муҳитда нефтнинг филтрланиш жараёнининг бир ўлчамли масаласини ошкор чекли айирмали схемада сонли моделлаштириш // Математик моделлаштириш, алгоритмлаш ва дастурлашнинг долзарб муаммолари: Республика илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами. 17-18 сентябрь, 2018. – Тошкент, 2018. – Б. 182-186.

21. Равшанов Н., Неъматов А., Назирова Э.Ш. Математическая модель, алгоритм и программа расчета основных показателей разработки нефти с учетом гель-частиц в пористых средах // Актуальные проблемы математического моделирования, алгоритмизации и программирования: Материалы Республиканской научно-практической конференции. 17-18 сентября 2018. – Ташкент, 2018. - С. 211-215.

22. Назирова Э.Ш. Математическая модель процесса фильтрации нефти в многопластовых пористых средах // Актуальные проблемы математики и механики - SAWMA-2018: Тез. докл. Республиканской научно-практической конференции с участием зарубежных женщин-ученых. 25-26 октября 2018. – Хива, 2018. - С. 50-51.

23. Неъматов А., Назирова Э.Ш. Ғовак муҳитда нефтнинг филтрланиш жараёнларини математик модели дастурий таъминоти // Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Свидетельство № DGU 04240. 16.02.2017 г.

24. Неъматов А., Назирова Э.Ш., Акбарова Н.Р., Содиков Р.Т. Газ конларини ишлаб чиқишнинг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш // Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Свидетельство № DGU 04285. 10.03.2017 г.

25. Равшанов Н., Назирова Э.Ш., Неъматов А. Программное обеспечение численного решения задачи фильтрации нефти в двухпластовых средах // Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Свидетельство № DGU 05207. 13.04.2018 г.

26. Равшанов Н., Назирова Э.Ш., Неъматов А., Содиков Р.Т., Улугбеков С.У. Программное обеспечение для вычисления основных показателей разработки газовых месторождений в динамически связанной двухпластовой системе // Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Свидетельство № DGU 05576. 17.08.2018 г.

27. Равшанов Н., Назирова Э.Ш., Неъматов А., Содиков Р.Т. Программное обеспечение численного решения задачи нестационарных процессов фильтрации сильно загрязненной нефти в пористой среде // Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Свидетельство № DGU 05892. 23.10.2018 г.

Автореферат «Информатика ва энергетика муаммолари» илмий журнали тахририятида тахрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус, инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди

Бичими: 84x60 1/16. «Times New Roman» гарнитура рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи: 3,75. Адади 100. Буюртма №29.

«Тошкент кимё-технология институти» босмахонасида чоп этилди.
100011, Тошкент, Навоий кўчаси, 32-уй.