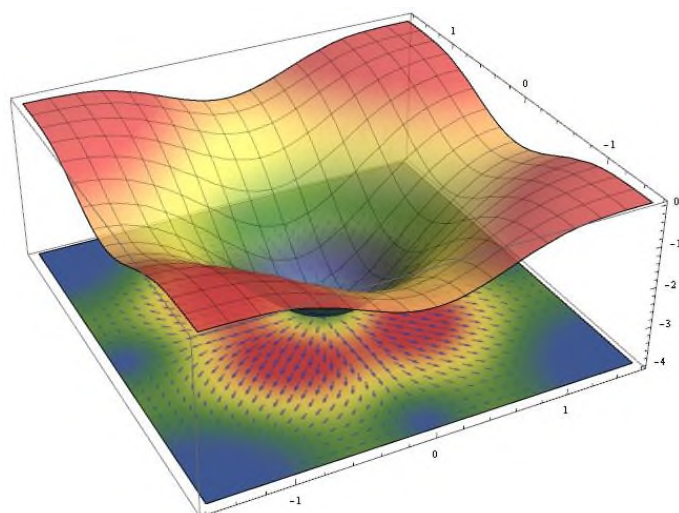
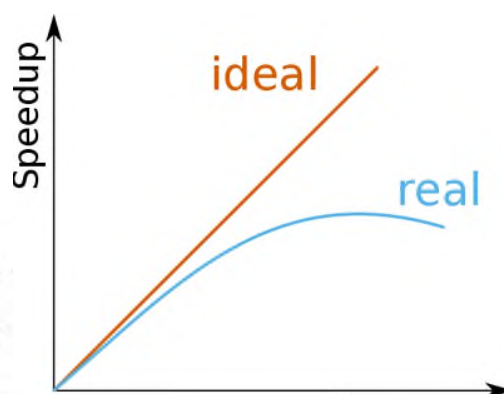


Неъматов А., Назирова Э.Ш., Исмаилов Ш.Р.

ҒОВАК МУҲИТДА НЕФТНИНГ КЎП ЎЛЧОВЛИ
ФИЛЬТРАЦИЯ МАСАЛАСИНИ СОНЛИ
МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ
АЛГОРИТМЛАР



$$S(p) = \frac{1}{(1-f) + \frac{f}{p}}$$



Toshkent 2023

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ВА
КОММУНИКАЦИЯЛАРИНИ РИВОЖЛАНТИРИШ ВАЗИРЛИГИ
ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ**

Неъматов А., Назирова Э.Ш., Исмаилов Ш.Р.

**ҒОВАК МУҲИТДА НЕФТНИНГ КЎП ЎЛЧОВЛИ
ФИЛЬТРАЦИЯ МАСАЛАСИНИ СОНЛИ
МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ
АЛГОРИТМЛАР**

Тошкент – 2023й.

УДК 512:519.6

Бош мухарири

Рақамли технологиялар
ва сунъий интелектини ривожлантириш
илмий тадқиқот институти лаборатория мудири
т.ф.д., профессор Равшанов Н.К.

Тақризчилар:

ТАТУ кафедра мудири
т.ф.д., профессор Зайниддинов Х.

Беларус-Ўзбекистон қўшма тармоқлараро
амалий техник квалификациялар институти
директори ф.-м.ф.д., профессор Жабборов Н.М.

Монографияда кўп ўлчовли масалаларда мураккаб ностационар нефть филтрация жараёнларини математик моделлаштириш бўйича тадқиқот ишларининг натижалари келтирилган. Нефть ва газ конларини ўзлаштириш кўрсаткичларини мониторинг қилиш, таҳлил ва башорат қилиш муаммоларини ҳал қилиш учун сонли моделлаштириш ва самарали рақамли алгоритмларни ишлаб чиқиш масалалари, қатламнинг ғовакли муҳити хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда кўриб чиқилган. Шунингдек, бу ишлаб чиқилган математик-дасатурий аппарат янги углеводород конларини лойиҳалаш муаммоларини ҳал қилишда қизиқиш уйғотади. Тақдим этилган материал ихтисослаштирилган олий ўқув юртлари талабалари ва ўқитувчилари, докторантлар, абитуриентлар ва илмий ҳамда касбий қизиқишлари бўлган ғовакли муҳитда мураккаб нефть ва газ филтрация жараёнларини математик моделлаштириш билан боғлиқ мутахассислар учун мўлжалланган. Монография ТАТУ Илмий кенгашининг қарори билан чоп этишга тавсия этилган (протокол №8-21 от 21.12.22).

МУНДАРИЖА

К И Р И Ш

I. ҒОВАК МУҲИТДА НЕФТНИНГ ФИЛЬТРАЦИЯ ЖАРАЁНИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШДА СОНЛИ УСУЛЛАР ВА САМАРАЛИ ҲИСОБЛАШ АЛГОРИТМЛАР ТАДБИҚИ

1.1. Ғовак муҳитда нефтнинг кўп ўлчовли филтрация масаласини ечишнинг самарали сонли усуллари таҳлили

1.2. Ғовак муҳитда нефть филтрация чегаравий масалаларини сонли моделлаштиришда самарали ҳисоблаш сонли усулларнинг қўлланилиши

1.3. Филтрация чегаравий масалаларини ечишда параллел ҳисоблаш алгоритмларини қўллашнинг умумий тамойиллари

1.4. Параллел ҳисоблаш алгоритм моделлари ва улар самарадорлигини баҳолаш

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСАЛАР

II. ҒОВАК МУҲИТДА ИККИ ЎЛЧОВЛИ НЕФТЬ ФИЛЬТРАЦИЯ МАСАЛАСИНИ ЧЕКЛИ АЙИРМАЛИ УСУЛДА ЕЧИШНИНГ САМАРАЛИ ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ АЛГОРИТМЛАРИ

2.1. Ғовак муҳитда нефть филтрацияси жараёни чегаравий масаласининг икки ўлчовли математик модели

2.2. Икки ўлчовли нефть филтрация чегаравий масаласини сонли моделлаштириш

2.3. Ғовак муҳитда нефтнинг икки ўлчовли филтрация чегаравий масаласини сонли ечишнинг параллел ҳисоблаш алгоритминини ишлаб чиқиш

2.4. Ҳисоблаш самарадорлигини баҳолаш ҳамда сонли натижаларни визуал формада тақдим этиш

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСАЛАР

III. ҒОВАК МУҲИТДА УЧ ЎЛЧОВЛИ НЕФТЬ ФИЛЬТРАЦИЯ МАСАЛАСИНИ ЕЧИШДА ЧЕКЛИ АЙИРМАЛИ СОНЛИ МОДЕЛЛАР ВА САМАРАЛИ ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ АЛГОРИТМЛАР

3.1. Ғовак муҳитда нефть филтрацияси масаласининг уч ўлчовли математик модели

3.2. Ғовак муҳитда уч ўлчовли нефть филтрация чегаравий масаласини сонли моделлаштириш

3.3. Ғовак муҳитда нефть филтрация чегаравий масаласини сонли ечишнинг параллел ҳисоблаш алгоритми

3.4. Нефть филтрация жараёнининг асосий кўрсаткичларини тадқиқ қилишда параллел ҳисоблаш алгоритмларининг самарадорлигини баҳолаш

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСАЛАР

IV. ҒОВАК МУҲИТДА ИККИ ЎЛЧОВЛИ НЕФТЬ ФИЛЬТРАЦИЯ МАСАЛАСИНИ ЕЧИШДА ДИФФЕРЕНЦИАЛ АЙИРМАЛИ СОНЛИ МОДЕЛЛАР ВА САМАРАЛИ ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ АЛГОРИТМЛАР

4.1. Ғовак муҳитда нефть филтрация жараёнининг икки ўлчовли математик модели

4.2. Икки ўлчовли нефть филтрация чегаравий масаласини сонли моделлаштиришда дифференциал айирмали усул

4.3. Нефтнинг икки ўлчовли филтрация чегаравий масаласини дифференциал айирмали усулда ечишнинг самарали параллел ҳисоблаш алгоритми

4.4. Ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш ҳамда сонли натижаларни солиштириш ва таҳлил қилиш

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСАЛАР

V. НЕФТЬ КОНЛАРИНИ ЎЗЛАШТИРИШДА ФИЛЬТРАЦИЯ АСОСИЙ КЎРСАТКИЧЛАРИНИ ТАҲЛИЛ ВА БАШОРАТ ҚИЛИШ ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ ДАСТУРИ

5.1. Филтрация жараёнини таҳлил қилиш ва башоратлашда ҳисоблаш дастурий таъминотининг асосий хусусиятлари

5.2. Нефть конларини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини ҳисоблашда параллел алгоритмлар самарадорлигини аниқлаш дастурий мажмуи

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСАЛАР

Фойдаланилган адабиётлар

ИЛОВАЛАР

К И Р И Ш

Иқтисодий ва ижтимоий ривожланишнинг асосий манбаларидан бири бўлган энергия, унинг дунё ва инсоният келажагидаги ҳал қилувчи мавқеи кундан-кунга ошиб бормоқда. Жаҳон энергия истеъмолига қарайдиган бўлсак, ҳар йили 8,8 миллиард тонна нефть эквивалентидаги энергия истеъмол қилинади. Ушбу истеъмолнинг тахминан 40% улуши нефть, 25% кўмир, 24,7% улуши табиий газ, 2,6% улуши гидроэнергетика, 7,6% улуши атом энергетикасидан олинади (Key World Energy Statistics 2007). Ушбу маълумотлардан кўриниб турибдики, нефть жаҳон энергия истеъмолида энг катта улушга эга бўлган энергия манбаи ҳисобланади. Асосий қайта тикланмайдиган энергия манбаларидан бири бўлган нефть оралиқ маҳсулот, хомашё, энергия ва энергия манбаи сифатида жаҳон иқтисодиётида жуда муҳим ўрин тутди. Қолаверса, кўплаб мамлакатларнинг жаҳон иқтисодиётида нефтьга эгаллик қилиш ёки уни назорат қилиш истаги нефтьнинг ажралмас сиёсий ресурс эканлигини кўрсатади.

Шу сабаб жаҳонда нефть ва газ саноатини ривожлантиришда олиб борилаётган илмий ва илмий-амалий тадқиқотлар энг долзараб масалаларидан ҳисобланиб келмоқда. Бу соҳада нефть ва газ конларининг янгиларини излаб топиш ва мавжуд конларнинг имкониятларидан тўлақонли фойдаланиш, қазиб олинаётган нефть ва газ маҳсулотлари ҳажмини ошириш бўйича олиб борилаётган илмий тадқиқот ишлари, математик моделлар ва самарали сонли алгоритмлар ҳамда дастурий таъминотларни ишлаб чиқишга катта эътибор қаратилмоқда. Нефть ва газ конлари ишлаши ҳамда уларни қазиб олиш мураккаб филтрацион жараён бўлиб, уни тадқиқ қилиш фақат замонавий компютер технологияларини қўллаш орқали амалга оширилади.

Маълумки замонавий компютер тизимлари турли ҳисоблаш тугунларига эга конфигурацияли ва ҳар хил частотали, турли ҳажмдаги хотирали ва бир хил архитектурадан иборат кўп процессорли компютерлардир. Бундай

компьютерлар биринчидан, параллел ҳисоблаш даражасини янада оширади, иккинчидан, биржинслимаслик параллел ҳисоблаш тизими имкониятини оширади.

Маълум бир соҳа амалий масалаларини ечишда қўйилган масалани сонли моделлаштириш ҳамда компьютерларда параллел ҳисоблаш алгоритмлари самарадорлигини ошириш учун юқори даражадаги тизимли дастурчилар керак бўлади.

Ҳозирги кунда ҳам нефтьнинг ғовак муҳитда филтрация масаласи учун кўплаб математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминотлар яратишга эътибор катта бўлиб қолмоқда. Бу эса шуни кўрсатадики, нефть ва газ конларининг ғовак муҳитларида бўладиган мураккаб жараёнларни тадқиқ қилиш ва башорат қилиш имконини берувчи математик моделлар, сонли натижаларни таҳлил қилиш ҳамда визуал кўринишдаги икки ва уч ўлчамли график ва анимация формаларида тақдим этувчи компьютерли моделлар яратиш, ҳисоблаш алгоритмларини такомиллаштириш куннинг асосий вазифалардан бири ҳисобланади. Шу билан бирга, ностационар филтрация жараёнларининг такомиллаштирилган математик моделларини, самарали сонли ҳисоблаш алгоритмларини ва дастурий мажмуаларини ишлаб чиқиш мақсадли илмий тадқиқотлардан ҳисобланади.

Республикамизда ҳам нефть ва газ саноатини ривожлантиришда олиб борилаётган илмий тадқиқот ишлари учун математик моделлар, самарали сонли алгоритмлар ҳамда дастурий таъминотларни яратиш бўйича тадқиқот ишларини олиб боришга катта эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича ҳаракатлар стратегиясини «. . . иқтисодиётнинг муҳим тармоқлари, жумладан, нефть ва газ саноати ҳам ашё захирасини кўпайтириш, ... , нефть ва газ конларидан фойдаланишнинг геодинамик жараёнларга таъсирини аниқлаш, нефть ва газ конларидан фойдаланиш билан боғлиқ башоратлаш имкониятини яратиш» вазифалари белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга

оширишда замонавий ахборот технологиялар асосида тадқиқ қилинаётган жараёнга таъсир қилувчи турли хил омилларни ҳисобга олган ҳолда математик моделлаштириш, ҳисоблаш тажрибаларини ўтказишнинг самарали алгоритми ва дастурий мажмуаларини яратиш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича “Ҳаракатлар стратегияси” га мувофиқ, нефть-газ саноати соҳасида ҳам қатор ўзгаришлар амалга оширилди. Жумладан, Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2020-йил 25-ноябрдаги 746-сон қарори “Нефть ва газ конларини ўзлаштиришнинг сейсмогеодинамик жараёнларга таъсирини мониторинг қилиш тизимини такомиллаштириш тўғрисида” қарорларида ва мазкур соҳага тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу монография муайян даражада хизмат қилади.

Суюқлик ва газлар филтрацияси жараёнларининг математик моделларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш, шунингдек, уларнинг яқинлашувчи-аналитик ечимларини куриш ва сонли усулларда ечишга бағишланган тадқиқот ишлари бир қанча чет эл олимлари Х. Азиз, Э. Сеттари, Н.Б. Лопук, А. Монтеиро, С. Банержее, Г.И. Баренблатт, М. Чраиби, В.Ф. Пивен, Ф. Боер, С. Лапуерта, С. Минжеауд, А.Х. Мирзаджанзаде, М.М. Хасанов, К.С. Басниев, С.Н. Закиров, Д.Ж. Ахмед-Заки, А.В. Никифоров, А.В. Сепаяевларнинг илмий ишларида тадқиқ қилинган.

Бундан ташқари М. Трапезникова, А.В. Ахметзянов, А. Никифоров, Д. Дуглас, А.А. Самарский, Стефан Т. Боодоо, Ажай Жоши, А. Эрмолаев, О. Гребенник, Бенгт Форнберг, Денис Счиозер, А. Ластовецкий, Б. Четверушкин каби олимларнинг ишларида айнан суюқлик ва газлар филтрацияси масалаларида самарали ҳисоблаш алгоритмлари ва жараёнга параллел ҳисоблаш дастурларини қўллаш масалалари қаралган.

Ғвак муҳитда суюқлик ва газларнинг кучли ўзгарувчан коэффицентли филтрация чегаравий масалаларни ечишда компьютерли моделлаштиришнинг тадқиқот қилиш ва реал объектларни математик

моделлаштириш усулларини ишлаб чиқиш билан чамбарчас боғлиқ. Бу тоифадаги масалаларни математик моделлаштириш ва сонли ечишга бағишланган тадқиқотлар бир қанча Ўзбекистонлик олимлари Д.Ф. Файзуллаев, Ф.Б. Абуталиев, А.И. Умаров, Б.Х. Хужаяров, Р. Садуллаев ва бошқа олимларнинг ишларида олиб борилган.

Ҳозирги кунда Ўзбекистон Республикасида ғовак муҳитларда суюқлик ва газлар филтрацияси жараёнларининг математик моделлари, самарали ҳисоблаш усуллари ва алгоритмларига оид тадқиқотлар билан ҳозирги кунда, асосан, Арипов М., Хужаяров Б.Х., Нормурадов Ч.Б., Равшанов Н, Неъматов А., Назирова Э.Ш. каби олимлар ўзларининг катта хиссаларини қўшиб келмоқдалар. Бундан ташқари “Рақамли технологиялар ва сунъий интеллектни ривожлантириш илмий-тадқиқот институте” профессори Нормоҳаммад Равшанов бошчилигидаги ёш олимлар лабораторияси, соҳага рақамли ҳисоблаш технологияларини тадбиқ қилиш ва компютерли ҳисоблашнинг самарали усулларини ишлаб чиқиш бўйича салмоқли ишлар қилинган.

I БОБ. ҒОВАК МУҲИТДА НЕФТНИНГ ФИЛЬТРАЦИЯ ЖАРАЁНИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШДА СОНЛИ УСУЛЛАР ВА САМАРАЛИ ҲИСОБЛАШ АЛГОРИТМЛАР ТАДБИҚИ

1.1. Ғовак муҳитда нефтнинг кўп ўлчовли фильтрация масаласини ечишнинг самарали сонли усуллари таҳлили

Нефть ёки газ конларини ўзлаштириш кўрсаткичлари сифатида етарли миқдордаги қатлам параметрлари қўлланилади. Энг муҳим кўрсаткичлар қуйидагилардир:

1. қатлам ва қудуқ босимининг вақт бўйича ўзгариши;
2. вақт ўтиши билан қудуқ дебитининг ўзгариши;
3. вақт ўтиши билан қудуқлар сонининг ўзгариши ва бошқалар.

Ушбу кўрсаткичларни ғовак муҳитда нефть ёки газнинг беқарор филтрацияси жараёнини адекват тавсифловчи чегаравий масалани сонли моделлаштириш ёрдамида аниқлаш мумкин. Нефть ва газ филтрацияси икки ўлчовли дифференциал тенгламаларининг мураккаблиги ва чизиқли бўлмаганлиги сабабли ҳозирги вақтда керакли аналитик ечимларни олиш мумкин эмас. Шунинг учун нефть ва газ конларини ўзлаштириш кўрсаткичларини ҳисоблаш ва компютерда ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун турли хил сонли усуллар, ҳисоблаш алгоритмлари ва уларнинг дастурий воситалари зарур. Шу билан бирга замонавий компютерлардан фойдаланган ҳолда тегишли самарали сонли усулларни қўллаш орқали ишончли сонли натижаларни олиш имконини беради.

Суюқлик ва газларнинг ғовакли муҳитда филтрация жараёни бўйича реал вақт режимида тўлиқ миқёсли тажрибалар ўтказиш жуда кўп вақт талаб қиладиган ва кўп маблағ талаб қилинадиган ишдир. Баъзан бундай тажрибалари мутлоқ ўтказиш мумкин эмас. Бундай ҳолларда объектни ўрганиш жараёнида муаммоларни ҳал қилиш учун самарали сонли усуллар ва

замонавий компьютер технологияларидан фойдаланган ҳолда амалга ошириш керак. Шу билан бирга, замонавий сонли усуллардан фойдаланиш, шунингдек, нефть ва газ конларининг асосий кўрсаткичларини тадқиқ қилиш ва таҳлил қилиш учун дастурий таъминот ишлаб чиқилиши тажрибалар учун вақтни тежашга хизмат қилади.

Маълумки, суюқлик ва газларнинг ғовак муҳитдаги беқарор филтрацион жараёнининг параболик типдаги хусусий ҳосилали дифференциал тенглама кўринишида ифодаланади. Бундай жараёнларни тадқиқ қилиш бу тенгламаларга қўйилган чегаравий масалаларни сонли усулларда ечиш билан амалга оширилади.

Параболик типдаги тенгламалар учун бир ўлчовли чегаравий масалалар ва уни сонли усулларда ечиш яхши ўрганилган. Олинган сонли натижалар бир қатор соддалаштирувчи тахминларга асосланади. Чегаранинг аналитик ечимини олишнинг иложи йўқлиги сабабли параболик турдаги кўп ўлчовли дифференциал тенгламаларни сонли усулларда ечиш учун турли хил сонли усуллар таклиф қилинади, бу усулларни юқори тезликда ишлайдиган компьютерлар орқали ҳисоблаш сззиларли ютуқлар беради.

Ҳозирги вақтда кўплаб амалий масалалар синфи борки, улар параболик типдаги кўп ўлчовли дифференциал тенгламалар билан ифодаланади, замонавий компьютерлар эса уларни сонли ечишга имкон беради. Бироқ, қараладиган уч ўлчовли филтрация оқими масалаларини ечиш катта геологик-физик маълумотларни талаб қилади. Бу маълум даражада, фақат иккита усулни кўриб чиқишни белгилайди, яъни параболик типдаги икки ўлчовли тенгламаларни ечишнинг Д. Дуглас ва А.А. Самарский ишлаб чиққан сонли усулларини.

Дуглас ва Самарский усуллари ғояси қуйидаги икки ўлчовли дифференциал тенглама мисолида етарлича аниқ тасвирланган:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + f. \quad (1.1)$$

Ҳозирча (1.1) тенгламани квадрат соҳада ечиш алгоритмини кўриб чиқамиз ва масалада бошланғич ва чегаравий шартларни шакллантириш қарамаймиз.

Икки ўлчовли параболик тенгламаларни сонли интеграллаш усулларининг моҳияти дастлабки тенгламанинг 2 та чекли айирмали тенглама кўринишида ёзилишидадир. Бунда масаланинг ечими иккита бир ўлчовли чекли айирмали масалаларни кетма-кет ечиш натижасида олинади.

Д. Дуглас усулига кўра, l –чи вақт қатламдаги масаланинг маълум ечими орқали, $(l+1)$ -чи вақт қатламидаги ечим кетма-кет аниқланади. Бунда қуйидаги иккита чекли айирмали тенгламалар тизими қаралади:

$$\frac{P_{i,j}^{l+1/2} - P_{i,j}^l}{\Delta \tau / 2} = \frac{P_{i-1,j}^{l+1/2} - P_{i,j}^{l+1/2} + P_{i+1,j}^{l+1/2}}{(\Delta x)^2} + \frac{P_{i,j-1}^l - P_{i,j}^l + P_{i,j+1}^l}{(\Delta y)^2} + f_{i,j}^l, \quad (1.2)$$

$$\frac{P_{i,j}^{l+1} - P_{i,j}^{l+1/2}}{\Delta \tau / 2} = \frac{P_{i-1,j}^{l+1/2} - P_{i,j}^{l+1/2} + P_{i+1,j}^{l+1/2}}{(\Delta x)^2} + \frac{P_{i,j-1}^{l+1} - P_{i,j}^{l+1} + P_{i,j+1}^{l+1}}{(\Delta y)^2} + f_{i,j}^{l+1}. \quad (1.3)$$

Бу ерда $P_{i,j}^{l+1}$, $P_{i,j}^l$ -тугун нуқталар, $(l+1)$ ва l вақт қатламидаги функция қиймати; $\Delta x, \Delta y, \Delta \tau$ -элементлар мос равишда x, y, t координата ўқлари бўйича қадамлар; ϕ -манба функцияси.

Бу (1.2) ва (1.3) тизимлар учун характерли томони шундаки, улар уч диагоналли матрицага эга. Бу ҳолат ҳар бир оралиқ вақт қадамида ҳайдаш сонли усулини қўллаган ҳолда ечимни топишга имкон беради. Чекли айирмалар тизими (1.2)-(1.3) ни ечиш ҳар бир вақт қатламида қуйидаги икки босқичда амалга оширилади.

Биринчи босқич: Д. Дуглас усулида, (1.2) тенгламалар тизими ҳайдаш усули билан ечилади. Ҳайдаш усули дискрет соҳанинг ҳар бир сатрида ox ўқи бўйича амалга оширилади ва масаланинг ечими $l+0.5$ вақт оралиғида олинади.

Иккинчи босқич: Худди шундай (1.3) тенгламалар тизими ечилади ва изланаётган ечим $l+1$ вақт қатламида топилади. Бу алгоритм кейинги вақт қатламларида ҳам худди шундай такрорланади.

А. Самарский усули бўйича (1.1) дифференциал тенглама қуйидаги иккита чекли айирмали тенгламалар тизими кўринишида аппроксимация қилинади:

$$l+1/2 \text{ вақт қатлами учун } \frac{P_{i,j}^{l+1/2} - P_{i,j}^l}{\Delta\tau} = \frac{P_{i-1,j}^{l+1/2} - P_{i,j}^{l+1/2} + P_{i+1,j}^{l+1/2}}{(\Delta x)^2} + f_{i,j}^{l+1/2}, \quad (1.4)$$

$$l+1 \text{ вақт қатлами учун } \frac{P_{i,j}^{l+1} - P_{i,j}^{l+1/2}}{\Delta\tau} = \frac{P_{i,j-1}^{l+1} - P_{i,j}^{l+1} + P_{i,j+1}^{l+1}}{(\Delta y)^2} + f_{i,j}^{k+1}. \quad (1.5)$$

Бу (1.4) ва (1.5) тенгламалар тизимининг ҳар бири уч диогоналли матрицага эга. Шунинг учун худди олдинги усул каби уни ечиш учун самарали ҳайдаш усулини қўллаш мумкин. Чекли айирмали (1.2) ва (1.3) ҳамда (1.4) ва (1.5) тенгламалар ошқормас бўлиб, абсолют турғундир.

Агар кўриб чиқилаётган жараён қуйидаги ўзгарувчан коэффициентли дифференциал тенглама билан тасвирланган бўлса, яъни

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma(x, y) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma(x, y) \frac{\partial P}{\partial y} \right) = v(x, y) \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1.6)$$

у ҳолда, А. Самарский усулига кўра (1.6) тенглама қуйидаги чекли айирмали тенгламалар тизими шаклида аппроксимация қилинади:

$$\sigma_{i+0.5,j} \frac{P_{i+1,j}^{l+1/2} - P_{i,j}^{l+1/2}}{(\Delta x)^2} + \sigma_{i-0.5,j} \frac{P_{i,j}^{l+1/2} - P_{i-1,j}^{l+1/2}}{(\Delta x)^2} - v_{i,j} \frac{P_{i,j}^{l+1/2} - P_{i,j}^l}{\Delta\tau} = 0, \quad (1.7)$$

$$\sigma_{i,j+0.5} \frac{P_{i,j+1}^{l+1} - P_{i,j}^{l+1}}{(\Delta y)^2} + \sigma_{i,j-0.5} \frac{P_{i,j}^{l+1} - P_{i,j-1}^{l+1}}{(\Delta y)^2} - v_{i,j} \frac{P_{i,j}^{l+1} - P_{i,j}^{l+0.5}}{\Delta\tau} = 0. \quad (1.8)$$

Ечим топиш усули ва тизимларнинг барча қайд этилган хусусиятлари (1.4) ва (1.5), (1.7) ва (1.8) чекли айирмали тенгламалар тизимлари учун ҳам амал қилади.

А.А. Самарскийнинг бу усули (1.6) тенгламанинг аппроксимацияси чекли айирмали тенгламалари (1.7) ва (1.8) тенгламалар ўзгарувчан коэффициентли бўлганда ҳам узилишга эга коэффициентлар синфида ҳам амал қилади. Лекин ҳисоблаш тажрибалари натижалари шуни кўрсатдики, Д.

Дуглас усули тенглама ўзгарувчан коэффициентли бўлганда ҳам яхши натижани беради.

Шуни айтиб ўтиш жоизки, кўп ўлчовли масалаларни ечишда А. Самарский кўндаланг-кесим схемасини ишлатишда ҳайдаш усулини кўллашни ташкил қилиш жараёни аҳамиятлидир. Бунда ҳисоблаш жараёни алгоритми қуйидагича бўлади:

Чекли айирмали тенгламалар тизимини ечиш аввало, Ox ўқи бойиша битта серия ҳайдаш усули бўйиша ҳисоблаш амалга оширилади. Кейин икки марта Oy ўқи бўйича ҳайдаш усули бажарилади ва кейин икки марта Ox ўқи бўйича ҳайдаш усули бажарилади ва ҳақозо. Ушбу алгоритмга риоя қилинганда, ҳисоблаш нафақат миқдорий, балки сифат жиҳатидан ҳам тўғри натижалар беради.

Кўп олчовли параболик типга қўйилган чегаравий масалаларни ечичнинг яна бир самарали усулларида бири, координаталарни ажратиш усули бўлиб ҳисобланади.

Реал муҳитда жараёнлар уч ўлчовга эга бўлган вақт ва маконда содир бўлади. Чекли-айирмали схемаларни куришда кўп ўлчовли филтрлаш масалаларига ўтиш фундаментал қийинчиликларни келтириб чиқармайди. Бироқ, чекли-айирмали тенгламалар тизимида номаълумлар сони сезиларли даражада ошади ва уни ечиш учун зарур бўлган арифметик амаллар сони ортади.

Говак муҳитда нефть филтрлациясининг ўлчовсиз тенгламасини куришни кўриб чиқамиз.

$$\frac{\partial P^*}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 P^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 P^*}{\partial y^{*2}} - q^* . \quad (1.9)$$

$$\text{бунда } P^* = P/P_0; \quad x^* = x/L; \quad y^* = y/L; \quad \tau = \frac{k_0 t}{\beta \mu L^2}; \quad q^* = \frac{q \mu}{\pi k_0 P_0 h_0} .$$

кейинги қадамда (*) белгиси қолдириб ёзилади.

Бу ерда P_0 характерли босим қиймати; $-k_0$ қатлам ўтказувчанлигининг бошланғич характерли қиймати;

h_0 - қатлам қалинлигининг характерли қиймати;

$$h_0 = \max(h(x, y));$$

характерли узунлик.

Одатда (1.9) тенгламани оператор кўринишида ёзиш қулай. Белгилаш қуйидагича кўринишда бўлади:

$$L_x = \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \quad L_y = \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

у ҳолда (1.9) тенглама қуйидаги шаклда қайта ёзилади:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = L_x P + L_y P - q.$$

босқичли чекли-айирмали тўрни киритамиз. Белгилаш киритамиз:

$$P_{i,j}^l = P(i\Delta x, j\Delta y, l\Delta \tau).$$

$$\Lambda_x P^l = \frac{P_{i+1,j}^l - 2P_{i,j}^l + P_{i-1,j}^l}{\Delta x^2},$$

$$\Lambda_y P^l = \frac{P_{i,j+1}^l - 2P_{i,j}^l + P_{i,j-1}^l}{\Delta y^2}.$$

тенглама учун иккита схема тузамиз:

$$\frac{P_{i,j}^{l+1} - P_{i,j}^l}{\Delta \tau} = \Lambda_x P^l + \Lambda_y P^l - \delta q_{i,j}^l, \quad (1.10)$$

$$\frac{P_{i,j}^{l+1} - P_{i,j}^l}{\Delta \tau} = \Lambda_x P^{l+1} + \Lambda_y P^{l+1} - \delta q_{i,j}^l. \quad (1.11)$$

Биринчи схема (1.10) ошкор бўлиб, бунда, A пастки вақт қатламида A нинг бешта қиймати бўйича аниқланади. Бунда $\Delta \tau / h^2 < 1/4$ шарт учун барқарор ҳисобланади. $P_{i,j}^{l+1}$ ни ҳисоблаш процессорда кўп вақтни талаб қилади, шунинг учун (1.10) схема самарасиз.

Иккинчи (1.11) схема ошқормас схема бўлиб, ҳар қандай $\Delta x, \Delta y, \Delta \tau$ учун барқарор, лекин $P_{i,j}^{l+1}$ ни ҳисоблаш учун кўп миқдордаги ҳисоб-китобларни талаб қиладиган матрицани тозалаш ёрдамида тенгламалар тизимини ечиш керак.

Математика ва физиканинг кўп ўлчовли масалаларини ҳал қилиш учун каср босқичлари усулига асосланган чекли-айирмали усуллар қўлланилади. Бундай схемалар мутлақ барқарорлик хусусиятига эга ва бир вақт қатлампидан иккинчисига ўтиш учун улар чекли-айирмали тўрнинг тугунлари сонига мутаносиб бўлган арифметик операциялар сонини талаб қилади. Фарқ схемаларининг бундай тежамкорлиги мураккаб кўп ўлчовли масалани ечиш ҳайдаш усули билан ечилган бир қатор бир ўлчовли муаммоларни ҳал қилишга қисқартирилиши туфайли эришилади.

Координаталарни ажратиш усули. Икки ўлчовли иссиқлик тенгламаси (1.9) ни ечиш мисолидан фойдаланиб, каср қадамлари усулининг вариантини - координатали бўлиниш усулини кўриб чиқамиз. $\Delta \tau = \tau^{n+1} - \tau^n$ вақт ораллиғини кўриб чиқинг ва (x, y) йўналиши бўйича босимнинг тарқалиш жараёнини шартли равишда икки босқичга бўлинг. Биринчи босқичда биз ғовак муҳитдаги суюқлик босими фақат Ox ўқи йўналиши бўйича, иккинчисидан Oy йўналиши бўйича тарқалади деб тахмин қиламиз. Ушбу гипотезани ҳисобга олган ҳолда, чекли-айирма схемасини қуйидаги шаклда ёзиш мумкин:

$$\frac{P_{i,j}^{l+0.5} - P_{i,j}^l}{\Delta \tau} = \frac{P_{i-1,j}^{l+0.5} - 2P_{i,j}^{l+0.5} + P_{i+1,j}^{l+0.5}}{\Delta x^2}, \quad (1.12)$$

$$\frac{P_{i,j}^{l+1} - P_{i,j}^{l+0.5}}{\Delta \tau} = \frac{P_{i,j-1}^{l+1} - 2P_{i,j}^{l+1} + P_{i,j+1}^{l+1}}{\Delta y^2} - \delta q_{i,j}^l, \quad (1.13)$$

ёки оператор формада:

$$\frac{P_{i,j}^{l+0.5} - P_{i,j}^l}{\Delta \tau} = \Lambda_x P^{l+0.5}, \quad (1.14)$$

$$\frac{P_{i,j}^{l+1} - P_{i,j}^{l+0.5}}{\Delta \tau} = \Lambda_y P^{l+1} - \delta q_{i,j}^l \quad (1.15)$$

Чекли-айирма схемаси (1.14) - (1.15) $P_{i,j}^l$ нинг маълум қийматларидан икки босқичда $P_{i,j}^{l+1}$ ни аниқлашга имкон беради. Биринчи босқичда $P_{i,j}^l$ берилган $P_{i,j}^{l+0.5}$ дан, иккинчи босқичда $P_{i,j}^{l+0.5}$ олинган $P_{i,j}^{l+1}$ дан ҳисобланади. Фарқ схемаси (1.14) - (1.15) ҳар икки йўналишда ошқормас, мутлақо барқарор, ҳайдаш усули билан ечилади. Чекли-айирма схемаси (1.12) - (1.13) $O((\Delta\tau) + \Delta x^2 + \Delta y^2)$ тартибли хато билан дастлабки муаммони тахмин қилади.

1.2. Ғовак муҳитда нефть филтрация чегаравий масалаларини сонли моделлаштиришда самарали ҳисоблаш сонли усулларнинг қўлланилиши

Бир ва кўп фазали нефть ва газ филтрация жараёнлари математик моделлари суюқликлар механикасининг умумий қонунларига асосланади ва тегишли бошланғич, чегаравий ва ички шартларга эга чизиқли ёки чизиқли бўлмаган параболик дифференциал тенгламалар тизимида ифодаланadi, умумий ҳолда уларнинг аналитик ечимини олиш мумкин эмас. Шунинг учун ғовак муҳитда нефть ёки газ оқимларининг филтрацияси математик моделларини қуришда аналитик ечимларни олиш имконини берувчи турли хил соддалаштиришлар қўлланилади. Бирок, реал вақтда нефть ва газ конлари ҳолатини таҳлил қилиш шуни кўрсатадики, соддалаштирилган математик моделлар ечими коннинг ҳақиқий параметрларига мос келмайди. Бинобарин, ушбу моделлар асосида олинган натижалар ҳақиқийлардан анча фарқ қилиши мумкин. Шунинг учун ҳам, реал вақт режимида ишлаётган нефть ва газ конларини таҳлил ва башорат қилиш учун амалда мос бўлиши мумкин бўлган умумий математик моделлар, самарали алгоритмлар ва дастурий воситаларни ишлаб чиқиш мақсадга мувофиқ ҳисобланади.

Сонли моделлаштиришнинг замонавий усуллари ҳамада уларнинг самарали алгоритмлари билан бир қаторда, янги авлод компьютерларида рақамли симуляция ташкил қилиш, самарали қўллаш, илмий тадқиқотлар учун янги оператив восита бўлиб хизмат қилмоқда. Бу ҳолда рақамли моделлаштириш нафақат миқдорий хусусиятларни олиш усули, балки ўрганилаётган жараённинг қонуниятларини аниқлаш усули ҳамдир.

Шундай қилиб, филтрация жараёнининг асосий томонларини қамраб олган у ёки бу физик модел асосида, шахсий компьютер ёрдамида сонли усуллар билан ечиладиган маълум бир тенгламалар тизими кўринишидаги тегишли математик моделни олиш мумкин.

Аниқ бир гидродинамик масалани рақамли моделлаштириш учун, унинг физик ва математик қўйилиши, унда қатнашадиган параметрлар ва уларнинг бошланғич қийматлари ҳамда аниқлик даражаси берилиши керак бўлади. Ишлатиладиган сонли усуллар самарали ва универсал, яъни барча бир хил типдаги амалий масалалар синфи учун мос бўлиши керак.

Маълумки амалий математика масалаларини ечишда компютерда қўйидаги занжирли технология ишлатилади: тадқиқот объекти –математик модел –сонли усул ва унинг алгоритми –компютер дастури –ЭХМда ўтказилган ҳисоблаш тажрибаси –тажрибанинг ўтказилган таҳлили (бошқа реал тажрибалардан олинган маълумотлар билан солиштириш ёки аниқ ечимлар билан солиштириш асосида). Математик технологиянинг объекти бу ҳисоблаш занжирнинг қисмидир: математик модел - бу компютерда сонли алгоритм-дастур-ҳисоблаш кетма-кетлиги. Ушбу технологиядан фойдаланиш қатламда нефть ва газни қазиб олишнинг ностационар жараёнларини таҳлил қилиш, башорат қилиш ва уларни назорат қилиш имконини беради [,].

Бошқариш тизимининг оптимал режимини ўрганиш ва ҳисоблашда тизимнинг тузилиши ва параметрлари аллақачон маълум бўлган деб тахмин қилинади. Қоида бўйича иш, танланган сифат мезонининг экстремумини таъминловчи бошқарув қонунларини аниқлаш бўйича олиб борилмоқда. Шу билан бирга, рационал тузилмани танлаш бошқарув муаммосини ҳал қилишнинг фундаментал имконияти, шу жумладан оптимал ечимга эришиш учун муҳим аҳамиятга эга эканлиги аниқланади.

Кўп ўлчовли нефть ностационар филтрацион жараёнларининг математик моделлари хусусий ҳосилалари бўлган дифференциал тенгламалар учун чегаравий масалаларга келтирилади. Замоनावий амалий математикада катта аҳамиятга эга бўлган математик физиканинг чегаравий масалаларини ечиш учун муаммога йўналтирилган дастурлаш тиллари ва ихтисослаштирилган алгоритмик ва дастурий таъминот тизимларини яратишдан кўпроқ самара олиш мумкин [44, 62, 98, 104].

Маълумки замонавий компютерларнинг дастурий таъминоти ҳисоблаш математикасининг турли муаммоларини ҳал қилиш учун кичик дастурлар кутубхоналарини ўз ичига олади. Бунинг ёрдамида алгоритмлар ва дастурларни батафсил ишлаб чиқишдан воз кечиш ва стандарт пакет дастурлардан фойдаланган ҳолда муаммоларни ҳал қилишга ўтиш мумкин бўлди. Масалан, замонавий алгоритмик тиллардаги илмий дастурлар тўпламига функцияларни сонли дифференциаллаш, интегралларни тақрибий ҳисоблаш, функцияларни интерполяция қилиш ва яқинлаштириш ва ҳоказолар учун кўплаб дастурлар мавжуд.

Ҳозирги вақтда жараёнларни автоматлаштириш ва турли илмий ва техник муаммоларни ҳал қилишга мўлжалланган бир қанча тиллар [102, 124, 126-128] мавжуд. Одатда ишлаб чиқилган ва янги яратилган дастурлаш тиллари компютерларнинг хилма-хиллиги ва ҳал қилинаётган муаммолар синфлари билан изоҳланади. Муаммога йўналтирилган тиллар ва ҳал қилинаётган вазифаларнинг ўзига хос хусусиятларини ва қўлланиладиган усулларни акс эттирувчи ихтисослаштирилган тизимлар алоҳида ўрин эгаллайди [35, 44, 105, 123]. Бундай тизимлардан фойдаланувчи фақат вазифани, дастлабки маълумотларни ва натижаларни чиқаришнинг керакли шаклини шакллантириши мумкин бўлади. Бошқача қилиб айтганда, ушбу билим соҳасидаги мутахассис алгоритмларни батафсил спецификация қилиш масалаларини ҳал қилмайди ва берилган муаммони ҳал қилиш учун операторлар кетма-кетлигини ишлаб чиқмайди, балки қайта ишланган объектлар ва ҳисоблаш жараёнларининг хусусиятларини профессионал тилда тасвирлайди, бу қўллаш соҳасини характерлайди.

Муаммога йўналтирилган тиллар ва ихтисослаштирилган тизимларнинг самарадорлиги кўплаб илмий ва техник муаммоларни ҳал қилиш учун зарур бўлган вақтни қисқартириш, шунингдек, қўлда дастурлашдан саноат усуллари ва янги дастурлаш технологиясига ўтиш учун асос яратишдан иборат. Бундай тиллар ва тизимлар ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш, математиклар ва муҳандисларни мураккаб дастурларни компиляция қилиш ва

катта ҳажмдаги дастурларни тузиш каби уларнинг мутахассислигига мос келмайдиган одатий ишлардан озод қилиш учун восита ҳисобланади.

Ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун моделлаштирилаётган жараёни жиддий ва чуқур ўрганиш керак. Бундан ташқари, математика ва физика масалаларини ечишда ҳисоблаш жараёнининг яқинлашуви ва барқарорлигини, ҳисоб-китобларнинг аниқлигини текшириш керак бўлади. Лекин нефть ва газларнинг говак муҳитда филтрланиш жараёнини тадқиқ қилиш учун шундай масалалар борки, масалан нефть ёки газ конларининг 10-20 йиллик ишлаши бўйича асосий кўрсаткичларни ҳисоблаш жуда кўп вақтни олади. Масалан, чизиксиз икки олчовли масалани ечиш учун оддий бир протессорли компьютерларда ҳисоблаш жараёни бир ва икки соатгача ҳам бўлиши мумкин (ҳисоблашдаги параметрлар қийматига қараб). Бундай ҳисоблашлар ҳажмини камайтириш учун сонли усулларни қўллашнинг параллел ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш ва компьютерда параллел ҳисоблаш дастурларидан фойдаланиш мақсадга мувофиқ. Ҳозирда параллел ҳисоблашларни амалга оширувчи бир қанча датураий воситалар борки улар фойдаланувчи учун катта қулайликларни яратади.

1.3. Филтрация чегаравий масалаларини ечишда параллел ҳисоблаш алгоритмларини қўллашнинг умумий тамойиллари

Нефть ва газ конлари филтрацион жараёнининг бир неча йиллик асосий кўрсаткичларини ҳисоблашнинг кўп ўлчамли масалаларини ечишда ҳамда компьютерда ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш жараёнида кўп вақт талаб этилади. Бундай жараёнларни амалга оширишда қўйилган масалани ечишнинг параллел ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш ва юқори тезликка эга бўлган кўп процессорли ҳисоблаш машиналаридан фойдаланиш мақсадга мувофиқдир. Бу ўз навбатида ҳисоблаш жараёнини бир неча баробар тезлаштиришга олиб келади.

Параллел ҳисоблаш – компюерда бир вақтнинг ўзида кўплаб ҳисоб-китобларни, яъни операцияларни бажаришнинг ҳисоблаш туридир. Маълумки катта ҳисоблаш жараёнлари (муаммолари) кўпинча бир вақтнинг ўзида ҳал қилиниши мумкин бўлган бир нечта кичик ҳисоблашлардан ташкил топиши мумкин. Компютерда параллел ҳисоблашнинг бир неча хилдаги шакллари мавжуд: бит даражаси, кўрсатмалар даражаси, маълумотлар ва вазифалар параллеллиги. Сўнгги йилларда компютерлар томонидан энергия истеъмоли муаммоси туфайли ва катта ҳисоблаш жараёнларида ҳисоблаш вақтини тежаш учун компютер архитектурасида параллел ҳисоблаш, асосан, кўп ядроли процессорлар кўринишидаги доминант компютерларни қўллаш самара бера бошлади.

Параллел ҳисоблаш бир вақтнинг ўзида ҳисоблаш билан чамбарчас боғлиқ - гарчи иккаласи бошқа-бошқа тушунча бўлса-да, улар кўпинча биргаликда ишлатилади ва кўпинча бирлаштирилади: параллеллик (масалан, бит параллелизми) ва параллелликсиз параллеллик (масалан, бир ядроли CPU да кўп вазифалилик) каби. Параллел ҳисоблашда ҳисоблаш топшириғи одатда мустақил равишда қайта ишланиши мумкин бўлган бир нечта, кўпинча жуда кўп, жуда ўхшаш кичик вазифаларга бўлинади ва уларнинг натижалари тугагандан сўнг бирлаштирилади. Бундан фарқли ўлароқ, бир вақтнинг ўзида

ҳисоблашда турли операциялар одатда тегишли вазифаларни бажармайди; улар амалга оширилганда, тақсимланган ҳисоблашда одатий ҳол бўлганидек, индивидуал топшириқлар турли атрибутларга эга бўлиши мумкин ва кўпинча бажариш жараёнида жараёнлараро алоқани талаб қилади.

Параллел компютерларни аппаратнинг параллелизмни қўллаб-қувватлаш даражасига кўра қуйидагича таснифлаш мумкин: кўп ядроли ва кўп процессорли компютерлар(битта машинада бир нечта ишлов бериш элементларидан фойдаланади), кластерлар, МПП лар ва гридлар (бир хил компютерларда ишлаш учун бир нечта компютерлардан фойдаланади). Баъзида маълум вазифаларни тезлаштириш учун анъанавий процессорлар билан бир қаторда ихтисослаштирилган параллел компютер архитектуралари қўлланилади.

Баъзи ҳолларда, бит бўйича ёки буйруқ даражасидаги параллелизм, параллел дастур тузишда қийинлик туғдирмайди, лекин аниқ параллел алгоритмларни ёзиш, кетма-кетликдан кўра қийинроқ, чунки параллеллик бир нечта янги хусусиятларни киритади. Турли хил кичик вазифалар ўртасидаги алоқа ва синхронизация, одатда, оптимал параллел дастур ишлашига эришиш учун энг катта тўсиқлардан бири ҳисобланади. Параллеллаштириш натижасида битта дастурни тезлаштиришнинг назарий юқори чегараси Амдал қонуни билан аниқланади.

Компютер дастурлари кетма-кет ҳисоблаш учун ёзилган. Муаммони ҳал қилиш учун алгоритм тузилади ва кўрсатмалар оқими кетма-кетлиги сифатида амалга оширилади. Ушбу кўрсатмалар компютернинг марказий процессорида бажарилади. Бир вақтнинг ўзида фақат битта кўрсатма бажарилиши мумкин - бу кўрсатма тугагач, кейингиси бажарилади.

Параллел ҳисоблаш эса муаммони ҳал қилиш учун бир вақтнинг ўзида бир нечта ишлов бериш элементларидан фойдаланади. Бу масалани мустақил қисмларга бўлиш йўли билан амалга оширишга ёрдам беради, шунда ҳар бир ишлов бериш элементи бошқалар билан бир вақтда алгоритмнинг ўзига хос қисмини бажариши мумкин. Рендерлаш элементлари хилма-хил бўлиши

мумкин ва улар бир нечта процессорли битта компьютер, бир нечта тармоққа уланган компьютерлар, ихтисослаштирилган ускуна ёки юқоридагиларнинг исталган комбинацияси каби ресурсларни ўз ичига олиши мумкин. Тарихий жиҳатдан параллел ҳисоблаш илмий ҳисоблаш ва илмий муаммоларни симуляция қилиш учун, айниқса метеорология каби табиий ва муҳандислик фанларида ишлатилган. Бунда параллеллик аппарат ва дастурий таъминотда юқори унумли ҳисоблашни лойиҳалашга олиб келади.

1980-йилларнинг ўрталаридан 2004-йилгача бўлган даврда компьютер иш фаолиятини яхшилашнинг асосий сабаби частотали масштаблаш эди. Дастурнинг ишлаш вақти кўрсатмалар сонининг ҳар бир кўрсатма учун ўртача вақтга кўпайтирилишига тенг. Қолган ҳамма нарсани доимий ушлаб туриш, соат частотасини ошириш буйруқни бажариш учун кетадиган ўртача вақтни қисқартиради. Шундай қилиб, частотанинг ортиши барча ҳисоб-китобларга боғлиқ дастурларнинг ишлаш вақтини қисқартиради. Бироқ, P қувват сарфи $P = C \cdot V \cdot F$ чипли тенглама билан берилган, бу ерда C - ҳар бир соат сиклидаги сифим назорати (кириш ўзгариши транзисторлар сонига мутаносиб), V - кучланиш, F эса процессор частотаси (секундига айланишлар). Частотанинг ортиши процессорда ишлатиладиган қувват миқдорини оширади.

Қувват истеъмоли ва қизиқ кетиш муаммосини ҳал қилиш учун марказий процессор (CPU ёки процессор) ишлаб чиқарувчилари кўп ядроли, қувватни тежайдиган процессорларни ишлаб чиқаришни бошладилар. Ядро процессорнинг ҳисоблаш бирлиги бўлиб, кўп ядроли процессорларда ҳар бир ядро мустақил бўлади ва бир вақтнинг ўзида бир хил хотирага кира олади.

Операцион тизимда турли вазифалар ва фойдаланувчи дастурлари мавжуд ядроларда параллел равишда ишлаши мумкин. Бироқ, кетма-кет дастурий таъминот дастури кўп ядроли архитектурадан тўлиқ фойдаланиши учун дастурчи кодни қайта қуриш ва параллеллаштириши керак. Амалий дастурий таъминотнинг ишлаш вақтини тезлаштиришга энди частотали масштаблаш орқали эришилмайди, бунинг ўрнига дастурчилар кўп ядроли

архитектураларнинг ортиб бораётган ҳисоблаш қувватидан фойдаланиш учун ўзларининг дастурий кодларини параллеллаштиришлари керак бўлади.

Математик моделлаштириш, алгоритмларни ишлаб чиқиш ва синовдан ўтказиш каби кенг кўламли симуляция ва маълумотларни қайта ишлаш ишларини бажариш учун асоссиз вақт талаб қилиниши ёки кўп компютер хотираси талаб қилиниши мумкин.

Кўп ядроли компютерлар, GPU лар, компютер кластерлари, тармоқ ва булут хизматлари каби юқори унумдор ресурслардан фойдаланиш орқали бу саъй-ҳаракатларни тезлаштиради. Matlab ва Simulink параллел ҳисоблаш маҳсулотлари компютер муҳити ва иш жараёнларига катта ўзгаришлар киритмасдан ишни тезлаштириш имконини беради.

Бир нечта ва юқори унумдор CPU ва GPU машиналаридан фойдаланиш орқали таҳлил ва симуляцияларни тезлаштириш мумкин. Параллел ҳисоблашда бажарилиши керак бўлган иш бир нечта иш сегментларига бўлинади ва ҳар бир иш сегментида топилган натижалар бир жойда (масалан, маинфреме) йиғилади, бу эса бу ишларни қисқа вақтда ва тезроқ бажариш имконини беради. Параллел ҳисоблаш орқали натижага тезроқ эришиш билан бир қаторда, иш бўлимларини бир вақтнинг ўзида бошқариш ва транзакцияларни бир вақтнинг ўзида бажариш орқали унумдорлик ҳам оширилади. Икки ва кўп ядроли процессорлар ёрдамида энди компютерлар операцияларни тезроқ ва қисқа вақт ичида бажариши, ҳаттоки камроқ қизиби кетиши ҳам мумкин. Параллел ҳисоблаш қуйидаги сабабларга кўра қўлланилиши мумкин:

-хотирани энг самарали ишлатиш орқали компютер ишининг секинлашишини олдини олиш,

- битта процессор ўрнига бир нечта (икки, тўртлик ва ҳоказо) процессорларни қўллаш орқали ҳароратнинг ошишини олдини олиш,

- ҳисоб-китобларнинг тез бажарилишини таъминлаш.

- тез ҳисоблаш билан самарадорликни ошириш.

- бир нечта қисмларга бўлиниши назарда тутилганлиги.

- бу қисмлар тенг вақт оралиқларига бўлиниши.

- ҳар бир иш бўлими бир вақтнинг ўзида турли процессорларда бир вақтнинг ўзида қайта ишланиши ва ҳисобланиши.

Параллелизм ҳақидаги биринчи ғоялар Жон Кок ва Даниел Слотник томонидан пайдо бўлган, улар биринчи марта 1958 йилда IBM тадқиқотларида рақамли ҳисоблашларни амалга ошириш мумкинлиги ҳақидаги ғояни киритганлар. 1960 йилга келиб, Новосибирск математика институти ходими Э. В. Евреинов бир-бири билан биргаликда дастурлаш мумкин бўлган параллел архитектураларни лойиҳалаштирганда параллел тушунчаси янгича тус олди. 1964 йилда Даниел Слотник Лоуренс Ливермор миллий лабораторияларида фойдаланиш учун катта параллел машиналарни ишлаб чиқди. 1967 йилда Ген Амдал ва Даниел Слотник АФИПС конференциясида параллел ишлов бериш имконияти ҳақида мақола чоп этишди. Бу параллелизмга оид баҳс мавзуси кейинчалик “Амдал қонуни” деб номланди. 1983 йилда Goodear Ayerospace NASA Goddvard учун Massively Parallel Processor (MPP) ни ишлаб чиқди. 1985 йилда Девид Гелернтер Линда параллел дастурлаш тизимининг асосларини баён қилди. 1986 йилда тақсимланган компютерларда керакли дастурий таъминотдан фойдаланиш учун Parallel Virtual Machine (PVM) лойиҳаси ишлаб чиқилди. 1993 йилда IBM PICC RS/6000 процессорига асосланган биринчи СП1 Powerparallel тизимини чиқарди. Параллел ҳисоблашнинг энг муҳим афзалликларидан бири масалани ечиш вақтини қисқартириш ва ечимга тезроқ эришишдир. Муаммо бир қисм сифатида эмас, балки қисмларга бўлинади ва ҳар бир қисм маълум вақт оралиғига бўлинади, бу эса осонроқ ва тезроқ ҳал қилишни таъминлайди. Параллел ҳисоблашда қисмларга бўлинган муаммоларнинг ҳар бири алоҳида компютерлар ёки процессорларда бажарилганлиги сабабли, ушбу қисмлардан бирида юзага келиши мумкин бўлган блокировка ёки хатолик, ҳатто бошқа қисмларда ҳам муаммонинг умумий муваффақиятига тўсқинлик қилиши мумкин. Бундан ташқари, ушбу қисмларнинг ҳар бирида вақт чегараси бўлганлиги сабабли, ҳар бир вазифа унга берилган вақт ичида ҳал қилиниши керак. Агар дастур билан параллел

ҳисоблаш амалга оширилса, бунинг учун тайёрланган MPI (Message Passing Interface) кутубхонасидан фойдаланиш мумкин. MPI билан биргаликда MPICH ва LAM иловаларидан, бошқа параллел ҳисоблаш кутубхоналари: Co-Array Fortran, Parallel Virtual Machine, Global Arrays, OpenMP, High Performance Fortran HPF, Unifiyed Parallel C/UPC, SHMEM, Occam, Silk лардан ҳам фойдаланиш мумкин. Параллел ҳисоблашни, яъни дастурни бир нечта қисмларга бўлиш орқали бир вақтнинг ўзида ҳал қилиш жараёнини амалга ошириш учун намунавий дастур амалга оширилди. Бунинг учун бир нечта турли дастурлардан фойдаланган ҳолда уч хил усулда ечим ишлаб чиқарилиши мумкин.

1) Амалдаги операцион тизимга виртуал қути (виртуал қути) ўрнатиш орқали ушбу виртуал машинага бир ёки бир нечта операцион тизимларни ўрнатиш мумкин. Шундай қилиб, ҳал қилиниши керак бўлган муаммо (дастур) ушбу виртуал қутидаги операцион тизимлар билан бўлиши мумкин.

2) Ечим Matlab каби дастурлар ёрдамида амалга оширилиши мумкин. Бунинг учун Matlabнинг Parallel Toolbox инфратузилмасидан фойдаланиш мумкин. 3.) Параллел ҳисоблаш Microsoft Visual Studio 6.0 Enterprise Edition билан биргаликда ишлайдиган MPICH2 дастури билан фойдаланиладиган MPI кутубхонаси ёрдамида амалга оширилиши мумкин.

Параллел ҳисоблашда бажариладиган иш бир нечта иш бўлимларга бўлинади, турли процессорлар ёки компьютерларда қайта ишланади ва ҳар бир иш бўлими натижалари бир жойда (масалан, асосий компьютер) қисқа вақт ичида қайта ишланади, тезроқ бажариш имконини беради. Турли компьютерларга ушбу вазифа ажратилган иш бўлимларини тақсимлаш Matlab Parallel Computing Toolbox ёрдамида амалга оширилиши мумкин. MATLAB ва Simulink дастурий муҳити ҳисобларни биз ишлаётган компьютерда ҳам, параллел ҳисоблаш воситаларига эга бошқа компьютер кластерида (кўп ядроли компьютер) ҳам тарқатиши мумкин.

Параллел процессор атамаси баъзан параллел ишлов бериш қобилиятига эга бўлган бир нечта процессорли компьютерни тасвирлаш учун ишлатилади.

Минглаб процессорларни ўз ичига олган тизимлар массив параллел тизимлар деб номланади. Кўп ядроли процессорлар параллел ҳисоблаш тизимлари учун ҳам мос келади.

Параллел компьютер (процессор) тузилмаларининг кенг ассортименти мавжуд. Ушбу вариантлар процессорлар (процессор элементи - ПЕ деб аталади) ёки процессор ва хотира ўртасидаги боғлиқлик билан белгиланади. Флйинн параллел компьютерларни барча процессорлар бир вақтнинг ўзида бир хил кўрсатмаларни (битта кўрсатмалар/кўп маълумотлар-SIMD) қайта ишлаши ёки ҳар бир процессор турли кўрсатмаларни қайта ишлаши (бир нечта кўрсатмалар/кўп маълумотлар-MIMD) бўйича таснифлайди. Параллел процессорли машиналар симметрик (барча процессорлар бир хил даражада) ва ассиметрик (баъзи вазифалар учун процессорлар ажратилган ва устуворликка эга) кўп процессорларга бўлинади.

n та параллел процессорли тизим тезлиги n марта юқори бўлган битта процессорга қараганда унчалик самарали эмас, лекин анча арзон. Параллел ҳисоблаш жуда кўп ҳисоблашни талаб қиладиган, тугатиш учун вақт чекловлари бўлган ва n та оқимга бўлинадиган вазифалар учун ажойиб ечимдир. Сўнгги йилларда суперкомпьютерлар деб номланувчи юқори самарали ҳисоблаш тизимлари параллел архитектурага эга.

Параллел ҳисоблаш фақат тегишли ускунани сотиб олгандан ва уланишларни амалга оширгандан кейингина муваффақиятли бўлади деб ўйламаслик керак. Амалда чизиқли тезлаштиришга (процессорлар сонига мутаносиб) эришиш жуда қийин. Бунинг сабаби шундаки, кўпгина алгоритмлар аслида кетма-кет характерга эга (Амдал қонуни буни илмий жиҳатдан тушунтирди).

Кўшимча процессорлар қўшилганлиги сабабли, баъзи иш юклари пипелине параллеллигидан фойдаланган ҳолда бир нуқтага қадар фойда келтиради. Ушбу тизим фасторй ассемблй лине ёндашувидан фойдаланган ҳолда нарсаларни бузади. Агар ишни n та босқичга бўлиш ва дискрет ўзгарувчини бир босқичдан иккинчисига ўтказиш мумкин бўлса, у ҳолда n тагача процессордан фойдаланиш мумкин. Бироқ, энг секин даража бошқа

даражаларни ушлаб туради ва тўлиқ ишлашда n процессордан фойдаланиш даргумон.

Параллел аппарат воситаларидан самаралироқ фойдаланиш учун кўплаб алгоритмларни қайта ишлаб чиқиш керак. Ягона процессорли тизимларда яхши ишлайдиган дастурлар параллел тизимларда яхши ишламаслиги мумкин. Худди шу дастурнинг бир нечта нусхалари бир-бирига халақит бериши мумкин (бир вақтнинг ўзида бир хил хотира манзилига ёзиш/ўқиш). Шунинг учун параллел тизимларда эҳтиёткорлик билан дастурлаш талаб этилади.

Параллел компьютерлар назарий жихатдан Parallel Random Access Machines (PRAM) сифатида моделлаштирилган. PRAM модели ҳисоблаш компонентлари ўртасидаги уланиш харажатларини эътиборсиз қолдиради, лекин барибир кўплаб муаммоларни параллел ҳал қилиш имконини беради.

Процессорлар муаммони ҳамкорликда ҳал қилишда бир-бири билан алоқа қилишлари керак ёки улар ишни тақсимловчи ва натижаларни йиғувчи бошқа процессор назорати остида бир-биридан бутунлай мустақил ишлаши мумкин.

Параллел компьютердаги процессорлар бир-бири билан турли йўллар билан боғланади. Булар: умумий хотира, шпал, умумий шина ёки юлдуз, ҳалқа, дарахт, гиперкуб, n -ўлчовли тўр ва бошқалар каби жуда кўп турли хил тармоқ топологиялари бўлиши мумкин. Параллел компьютерлар бир-бирига тўғридан-тўғри боғланмаган тугунларда хабар алмашиш учун баъзи маршрутлаш усулларига муҳтож. Катта ўлчамли кўп процессорли машиналарда алоқа муҳити иерархикдир.

Хотира ҳар бир процессор учун ягона бўлиши мумкин, бир қатор процессорлар учун умумий ёки тўлиқ бўлиши ҳам мумкин. Параллел ҳисоблаш усуллари қуйидагилардан иборат:

- Кўп ишлов бериш
- Компьютерларни кластерлаш
- Параллел суперкомпьютерлар

- Тарқалган ҳисоблаш
- NUMA, SMP ва массив параллел тизимлар
- Тўрни ҳисоблаш

Параллел компютерларда дастурлаш учун операцион тизим даражасида ва дастурлаш тили даражасида кўплаб дастурий тизимлар ишлаб чиқилган. Ушбу тизимлар муаммони қисмларга бўлиш ва процессорларга белгилаш имконини берувчи турли механизмларни ўз ичига олиши керак. Яширин параллелизм - компилятор ёки бошқа дастур муаммони қисмларга ажратиб, уни автоматик равишда процессорларга тайинлашидир. Аниқ параллелизм бу дастурчи муаммони қандай қисмларга ажратиш кераклигини белгилаб беришидир. Ҳозирги вақтда кўплаб параллел ишлов бериш компиляторлари бир қатламли параллелизмни кўллаб-қувватлайди. Кўп қатламли параллелизмда параллел равишда ишлайдиган оқимлар кўпроқ параллеллик учун яна бўлинади. Семафор ва монитор деб аталадиган синхронизация тузилмалари ёрдамида жараёнларнинг ресурсларини тақсимлашда зиддият ҳолатининг олди олинади.

Юкни мувозанатлаш баъзи вазифаларни оғир юкланган процессордан энгилроқ юкланган процессорларга ўтказди, шунда уларнинг барчаси бир вақтнинг ўзида банд бўлади.

Параллел дастурлаш - бу жараёнлар ўртасида аниқ белгиланган алоқа тузилмаларидан фойдаланадиган ва самарадорликни ошириш учун жараёнларни параллел равишда қайта ишлашга имкон берувчи тузилма. Бир вақтнинг ўзида дастурлаш ишлашдан ташқари бошқа сабабларга кўра бир вақтда жараёнлар ўртасидаги янги алоқа усулларига асосланади. Жараёнлараро алоқа одатда умумий хотира ёки хабарларни узатиш техникаси орқали амалга оширилади.

Параллел дастурлаш модели - параллел алгоритмларни тавсифловчи дастурий таъминот технологиялари тўплами. Ушбу модел иловалар, тиллар, компиляторлар, кутубхоналар, алоқа тизимлари ва параллел киритиш-

чиқаришларни камраб олади. Дастурчилар ўзлари ва иловалари учун мос модел ёки аралаш моделни танлаш орқали ўз иловаларини ишлаб чиқадилар. Ушбу моделлар иккига бўлинади: умумий хотира тизимлари ва тақсимланган хотира тизимлари. Кўп қўлланиладиган параллел дастурлаш моделлари: PVM, MPI, OpenMP, Global Arrays, So-Array Fortran, UPS, HPF, SHMEM, Ossam, Linda, Silk.

1.4. Параллел ҳисоблаш алгоритм моделлари ва улар самарадорлигини баҳолаш

Бир вақтнинг ўзида ишлов бериш. Компютерларнинг имкониятлари ва Интернетнинг ўсиши маълумотларни сақлаш ва қайта ишлаш усулларини ўзгартирди. Биз маълумотлар жуда кўп бўлган асрда яшаймиз. Ҳар куни биз мураккаб ҳисоблашларни талаб қиладиган ва шу билан бирга тез вақт ичида катта ҳажмдаги маълумотлар билан шуғулланамиз. Баъзан биз бир вақтнинг ўзида содир бўладиган ўхшаш ёки ўзаро боғлиқ воқеалардан маълумотларни олишимиз керак. Бу ерда биз **бир вақтнинг ўзида ишлов беришни** талаб қиламиз, бу мураккаб вазифани бўлиниши ва уни тез вақт ичида ишлаб чиқариш учун бир нечта тизимларни қайта ишлаши мумкин.

Вазифа мураккаб маълумотларнинг катта қисмини қайта ишлашни ўз ичига олган ҳолда, бир вақтнинг ўзида ишлов бериш жуда муҳимдир. Масалан, йирик маълумотлар базаларига кириш, самолёт синовлари, астрономик ҳисоблар, атом ва ядро физикаси, биотиббиёт таҳлили, иқтисодий режалаштириш, тасвирни қайта ишлаш, робототехника, об-ҳаво прогнози, веб-га асосланган хизматлар ва бошқалар.

Параллелизм. Параллелизм - бу бир вақтнинг ўзида бир нечта кўрсатмалар тўпламини қайта ишлаш жараёни. Бу умумий ҳисоблаш вақтини қисқартиради. **Параллелизм параллел компютерлар**, яъни кўп процессорли компютерлар ёрдамида амалга оширилиши мумкин. Параллел компютерлар

параллел алгоритм, дастурлаш тиллари, компиляторлар ва кўп вазифаларни қўллаб-қувватлайдиган операцион тизимни талаб қилади.

Алгоритмни лойиҳалашда биз алгоритм бажариладиган компьютернинг архитектурасини ҳисобга олишимиз керак. Архитурага кўра, компьютерларнинг икки тури мавжуд -

- Кетма-кет компьютер
- Параллел компьютер

Компютерлар архитектурасига қараб, бизда икки хил алгоритм мавжуд -

- **Кетма-кет алгоритм** - муаммони ҳал қилиш учун кўрсатмаларнинг бир неча кетма-кет кадамлари хронологик тартибда бажариладиган алгоритм.

Параллел алгоритм - муаммо кичик муаммоларга бўлинади ва индивидуал натижаларни олиш учун параллел равишда бажарилади. Кейинчалик, ушбу индивидуал чиқишлар якуний керакли натижани олиш учун бирлаштирилади. Бу алгоритм турли хил ишлов бериш қурилмаларида бир вақтнинг ўзида бир нечта кўрсатмаларни бажара оладиган ва якуний натижани ишлаб чиқариш учун барча индивидуал натижаларни бирлаштира оладиган алгоритм.

Катта муаммони **кичик муаммоларга** бўлиш осон эмас. Кичик муаммолар улар орасида маълумотларга боғлиқ бўлиши мумкин. Шунинг учун процессорлар муаммони ҳал қилиш учун бир-бири билан алоқа қилишлари керак.

Аниқланишича, процессорларнинг бир-бирлари билан мулоқот қилишлари учун зарур бўлган вақт ҳақиқий ишлов бериш вақтидан кўпроқ. Шундай қилиб, параллел алгоритмни лойиҳалашда самарали алгоритмни олиш учун процессордан тўғри фойдаланишни ҳисобга олиш керак.

Алгоритмни тўғри лойиҳалаш учун биз параллел компютерда ҳисоблашнинг асосий модели ҳақида аниқ тасаввурга эга бўлишимиз керак.

Ҳисоблаш модели. Ҳам кетма-кет, ҳам параллел компютерлар алгоритмлар деб аталадиган кўрсатмалар тўплами (оқими) бўйича ишлайди. Ушбу кўрсатмалар тўплами (алгоритм) компютерга ҳар бир қадамда нима қилиш кераклиги ҳақида кўрсатма беради.

Кўрсатмалар оқими ва маълумотлар оқимига қараб, компютерларни тўрт тоифага бўлиш мумкин -

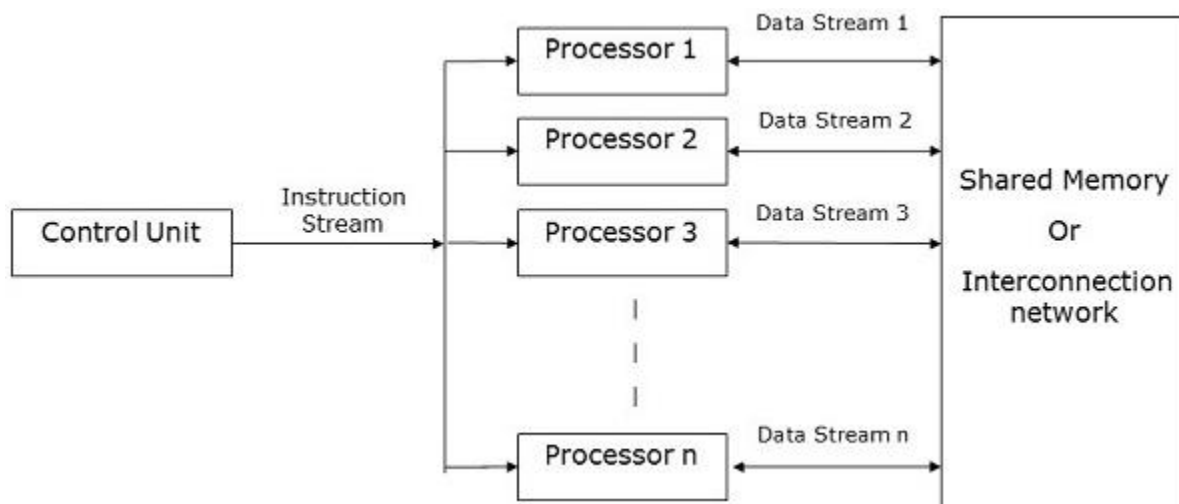
- Ягона кўрсатмалар оқими, Ягона маълумотлар оқими (SISD) компютерлари
- Ягона кўрсатмалар оқими, Бир нечта маълумотлар оқими (SIMD) компютерлари
- Бир нечта кўрсатмалар оқими, Ягона маълумотлар оқими (MISD) компютерлари
- Бир нечта кўрсатмалар оқими, Бир нечта маълумотлар оқими (MIMD) компютерлари

SISD компютерларида **битта бошқарув блоки, битта процессор ва битта хотира блоки** мавжуд.



Бу турдаги компютерларда процессор бошқарув блокидан кўрсатмаларнинг бир оқимини олади ва хотира блокидан маълумотларнинг бир оқимида ишлайди. Ҳисоблаш жараёнида ҳар бир босқичда процессор бошқарув блокидан битта кўрсатма олади ва хотира блокидан олинган битта маълумот устида ишлайди.

SIMD компютерлари **битта бошқарув блоки, бир нечта ишлов бериш блоклари ва умумий хотира ёки ўзаро уланиш тармоғини ўз ичига олади.**

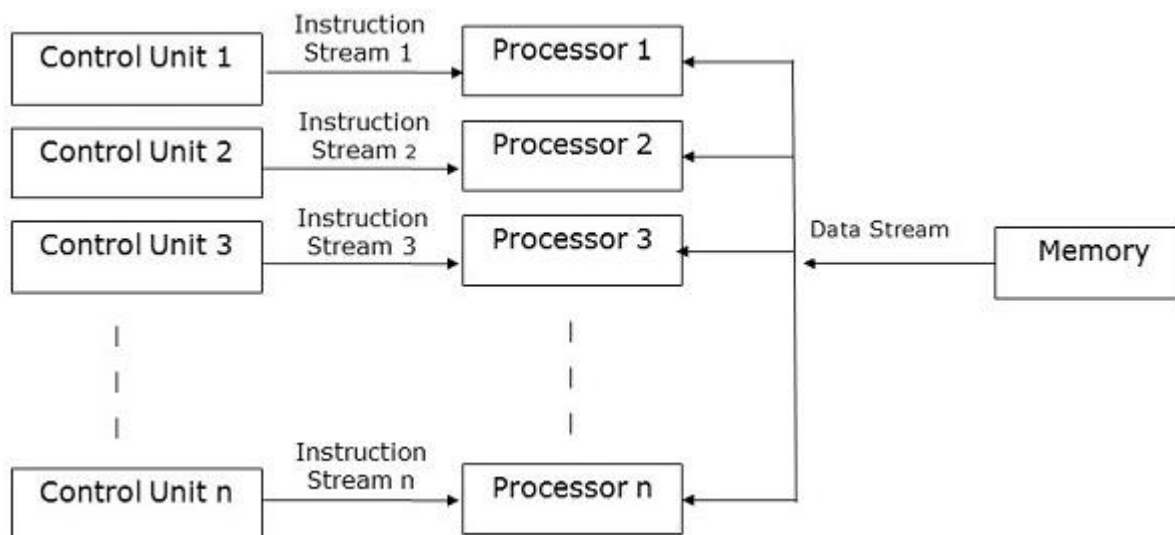


Бу ерда битта бошқарув блоки барча ишлов бериш бирликларига кўрсатмалар юборади. Ҳисоблаш жараёнида, ҳар бир босқичда, барча процессорлар бошқарув блокидан битта кўрсатмалар тўпламини олади ва хотира блокадаги турли хил маълумотлар тўпламида ишлайди.

Процессорларнинг ҳар бири маълумотларни ва кўрсатмаларни сақлаш учун ўз маҳаллий хотира блокига эга. SIMD компютерларида процессорлар ўзаро мулоқот қилишлари керак. Бу **умумий хотира ёки ўзаро алоқа тармоғи** орқали амалга оширилади.

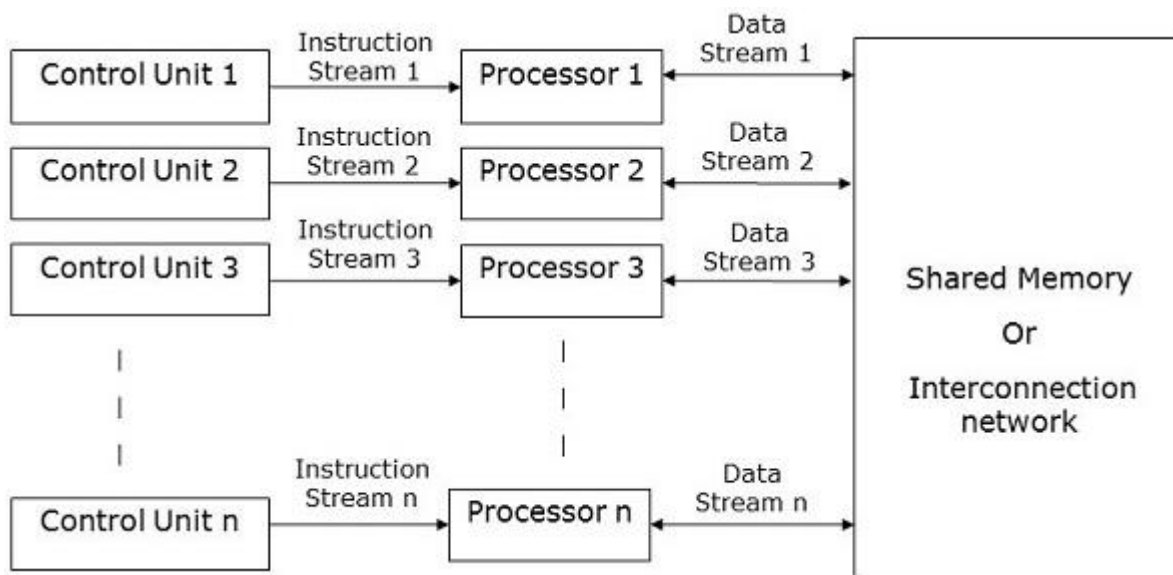
Баъзи процессорлар кўрсатмалар тўпламини бажарётганда, қолган процессорлар кейинги кўрсатмалар тўпламини кутишади. Бошқарув блокнинг кўрсатмалари қайси процессор **фаол** бўлишини (кўрсатмаларни бажариш) ёки **фаол эмаслигини** (кейинги кўрсатмаларни кутинг) ҳал қилади.

Номидан кўриниб турибдики, MISD компютерларида **бир нечта бошқарув блоклари, бир нечта ишлов бериш блоклари ва битта умумий хотира блоклари** мавжуд.



Бу ерда ҳар бир процессор ўзининг бошқарув блокига эга ва улар умумий хотира блокига эга. Барча процессорлар ўзларининг бошқарув блокларидан кўрсатмалар оладилар ва улар ўзларининг бошқарув блокларидан олган кўрсатмаларга мувофиқ ягона маълумотлар оқидамида ишлайди. Ушбу процессор бир вақтнинг ўзида ишлайди.

MIMD компьютерларида бир **нечта бошқарув блоклари, бир нечта ишлов бериш блоклари** ва **умумий хотира ёки ўзаро уланиш тармоғи** мавжуд.



Бу ерда ҳар бир процессорнинг ўз бошқарув блоки, маҳаллий хотира блоки ва арифметик ва мантиқий блоки мавжуд. Улар ўзларининг тегишли бошқарув блокларидан турли хил кўрсатмалар тўпламини оладилар ва турли маълумотлар тўпламида ишлайдилар.

- Умумий хотирага эга бўлган MIMD компьютерлари **мультипроцессорлар**, ўзаро уланиш тармоғидан фойдаланадиганлари эса мултикомпютерлар деб **номланади**.
- Процессорларнинг жойлашув масофасидан келиб чиққан ҳолда, мултикомпютерлар икки хил бўлади -
 - **мултикомпютер** - барча процессорлар бир-бирига жуда яқин бўлганда (масалан, битта хонада).
 - **Тақсимланган тизим** - барча процессорлар бир-биридан узоқда жойлашганда (масалан, турли шаҳарларда)

Параллел алгоритмлар таҳлили. Алгоритмни таҳлил қилиш алгоритм самарали ёки йўқлигини аниқлашга ёрдам беради. Умуман олганда, алгоритмнинг бажарилиш вақти (**Вақт мураккаблиги**) ва унга керак бўлган бўш жой миқдори (**Космик мураккаблик**) асосида таҳлил қилинади.

Бизда арзон нархларда мавжуд бўлган мураккаб хотира қурилмалари мавжуд бўлганлиги сабабли, сақлаш жойи энди муаммо эмас. Демак, космик мураккабликка унчалик аҳамият берилмайди.

Параллел алгоритмлар компьютернинг ҳисоблаш тезлигини ошириш учун мўлжалланган. Параллел алгоритмни таҳлил қилиш учун биз одатда қуйидаги параметрларни кўриб чиқамиз -

- Вақтнинг мураккаблиги (бажариш вақти),
- Амалдаги процессорларнинг умумий сони,
- Умумий харажат.

Алгоритмнинг бажарилиш вақтини баҳолаш унинг самарадорлигини таҳлил қилишда жуда муҳимдир. Бажарилиш вақти алгоритм томонидан муаммони ҳал қилиш учун сарфланган вақт асосида ўлчанади. Умумий бажарилиш вақти алгоритм бажарила бошлаган пайтдан то тўхтаб қолган вақтгача ҳисобланади. Агар барча процессорлар бир вақтнинг ўзида бажаришни бошламаса ёки тугатмаса, у ҳолда алгоритмнинг умумий бажарилиш вақти биринчи процессор ўз ишини бошлаган вақтдан охириги процессор ўз бажарилишини тўхтатган пайтгача бўлади.

Алгоритмнинг вақт мураккаблигини уч тоифага бўлиш мумкин-

- **Энг ёмон ҳолатдаги мураккаблик** - Берилган кириш учун алгоритм томонидан талаб қилинадиган вақт **максимал** бўлганда.
- **Ўртача мураккаблик** - берилган кириш учун алгоритм томонидан талаб қилинадиган вақт миқдори **ўртача** бўлганда.
- **Энг яхши ҳолат мураккаблиги** - Берилган кириш учун алгоритм томонидан талаб қилинадиган вақт **минимал** бўлганда.

Алгоритмнинг мураккаблиги ёки самарадорлиги - бу алгоритм томонидан керакли натижани олиш учун бажариладиган қадамлар сони. **Асимптотик таҳлил** алгоритмни назарий таҳлил қилишда унинг мураккаблигини ҳисоблаш учун амалга оширилади. Асимптотик таҳлилда алгоритмнинг мураккаблик функциясини ҳисоблаш учун киритишнинг катта узунлигидан фойдаланилади. Асимптотик белгилар юқори ва паст тезлик чегараларидан фойдаланган ҳолда алгоритмнинг энг тез ва энг секин бажарилиш вақтини тасвирлашнинг энг осон усули ҳисобланади.

Параллеллаштириш самарадорлигининг асосий ўлчови тезликни оширишдир, параллеллаштириш самарадорлиги(S_N), битта процессордаги ҳисоблаш иш юкини(W) бажариш вақтининг n процессордаги вақтга нисбати сифатида аниқланади, яъни

$$S_N = \frac{\tau_1}{\tau_N} \quad (1)$$

Бунда, τ_1 - битта процессорда иш юкини бажариш вақти ва τ_N - n процессорда иш юкини бажариш вақти.

τ_N вақти қуйидаги уч та ҳад йиғиндиси орқали ҳисобланади,

$$\tau_N = \tau_s + \tau_p + \Delta\tau$$

бунда иш юкининг кетма-кет қисмини бажариш учун кетган вақт τ_s , параллел қисми бажариш учун кетган вақт τ_p ва жараённи параллеллаштириш учун кетган қўшимча вақт $\Delta\tau$, бунда $\Delta\tau$ умумий ҳолатда барча қўшимча вақтлар сарфини ҳисобга олади. Қўшимча вақтлар сарфини келтириб чиқарувчи омиллар одатда аппарат, тармоқ, операцион тизим ёки алгоритмни параллел

процессорда амалга ошириш учун кетиб қолиши мумкин. Биз буни процессорлар сони n ва иш юки W га нисбатан функция сифатида қарасак қуйидаги ҳолат келиб чиқади,

$$\Delta\tau = \Delta\tau(N, W)$$

Назарий тезлаштириш, S_N^{th} , нол параллелизация қўшимча харажатларини назарда тутадиган тезликдир,

$$S_N^{th} = \frac{\tau_1}{\tau_p + \tau_s}$$

Ҳақиқий тезлик (1) формуладан қуйидагича кўриниш олади:

$$S_N = \frac{\tau_1}{\tau_p + \tau_s + \Delta\tau}$$

Бундан кўринадики, назарий тезлаштириш самарадорлик жиҳатидан эришиш мумкин бўлган энг яхши ҳолатдир. Ҳақиқий тезлаштиришнинг назарий тезликка нисбати параллеллаштириш самарадорлиги коэффициентига тенг,

$$\epsilon_N = \frac{S_N}{S_N^{th}}$$

Бу коэффициент параллел процессорнинг берилган параллел алгоритмни бажариш самарадорлигини билдирувчи ўлчовдир. Бундан, параллеллаштириш самарадорлиги коэффициенти қўшимча вақт сарфи туфайли ишлашнинг ҳар қандай жараёнларида ҳам бирдан кам бўлишини билиш мумкин.

Энди кетма-кет жараённи ҳисоблаш ҳолатини қарасак,

$$f = \frac{W_S}{W} = \frac{W_S}{W_S + W_P}$$

бу ерда W - кетма-кет иш юки W_C ва параллел иш юки W_{Π} нинг йиғиндисидан иборат бўлган умумий ҳисоблаш иш юкига тенг, таърифи бўйича ҳисоблаш, процессорлар сони n та бўлган ҳолатида ҳам ўринли ҳисобланади. Биз W ни иш юкининг ихтиёрий бирликларида аниқлаймиз ва процессор тезлигини ν (секундига иш юки бирлиги) деб фараз қиламиз, бу назарий тезликни қуйидаги ифодага олиб келади:

$$S_N^{th} = \frac{\tau_1}{\tau_p + \tau_s} = \frac{W/\nu}{\frac{(1-f)W}{N\nu} + \frac{fW}{\nu}}$$

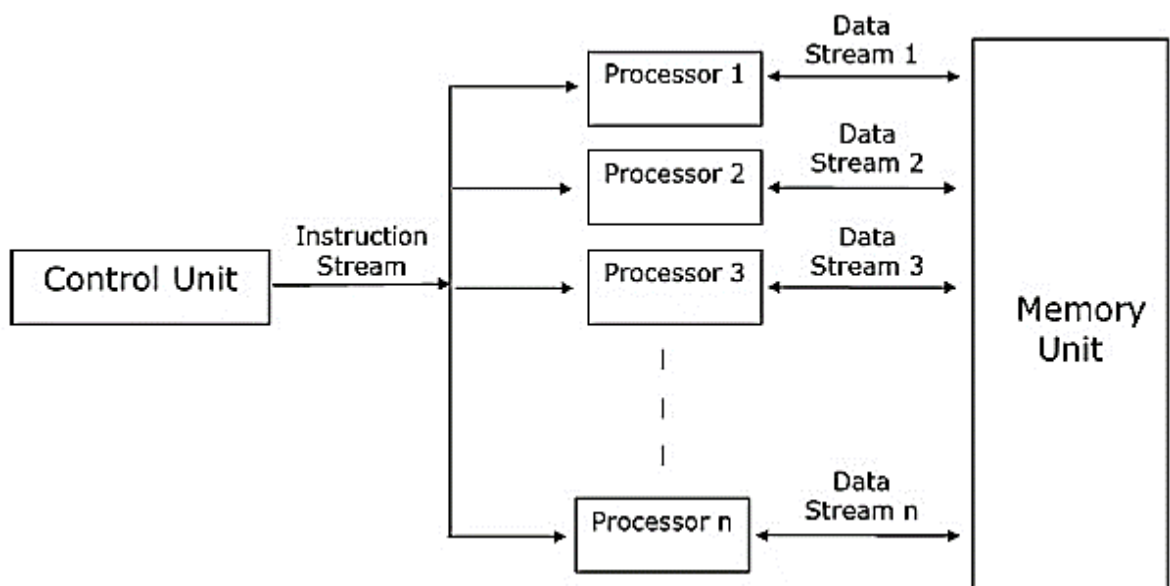
ёки

$$S_n^{th} = \frac{1}{\frac{(1-f)}{N} + f}$$

Параллел алгоритм модели, маълумотларни ва қайта ишлаш усулини бўлиш стратегиясини кўриб чиқиш ва ўзаро таъсирларни камайтириш учун мос стратегияни қўллаш орқали ишлаб чиқилган. Биз қуйидаги параллел алгоритм моделларини таҳлил қиламиз:

- Маълумотларнинг параллел модели
- Вазифа граф модели
- Иш ҳовузи(Work pool) модели
- Уста ишчи(Master slave) модели
- Ишлаб чиқарувчининг истеъмолчи ёки қувур линияси модели
- Гибрид модел

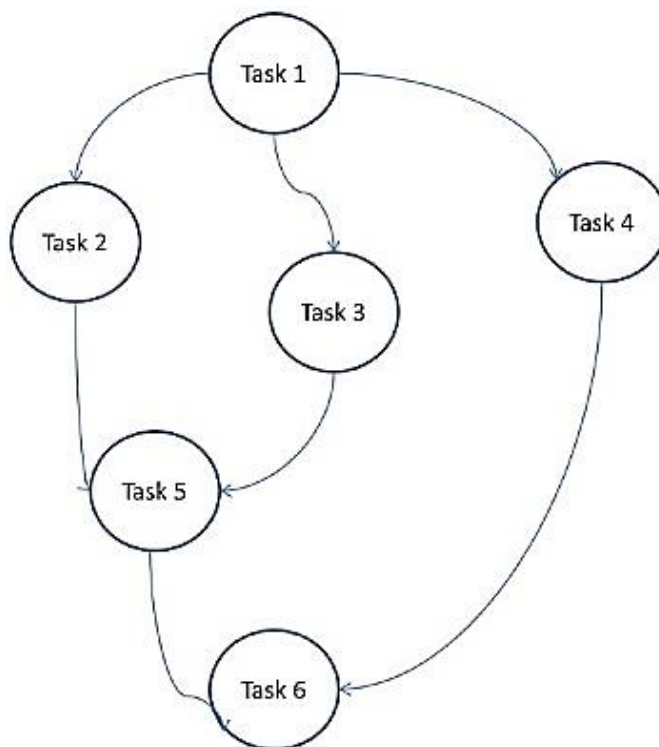
Маълумотлар параллел моделида вазифалар жараёнларга берилади ва ҳар бир вазифа турли хил маълумотларга ўхшаш операцияларни бажаради. **Маълумотлар параллеллиги** бир нечта маълумотлар элементларида қўлланиладиган битта операцияларнинг натижасидир.



Маълумотларга параллел модел умумий манзил фазоларида ва хабарларни узатиш парадигмаларида қўлланилиши мумкин. Маълумотларнинг параллел моделда ўзаро таъсирнинг қўшимча харажатлари парчаланишни сақлайдиган жойни танлаш, оптималлаштирилган коллектив ўзаро таъсир тартибларини қўллаш ёки бир-бирига мос келадиган ҳисоблаш ва ўзаро таъсир қилиш орқали камайтирилиши мумкин.

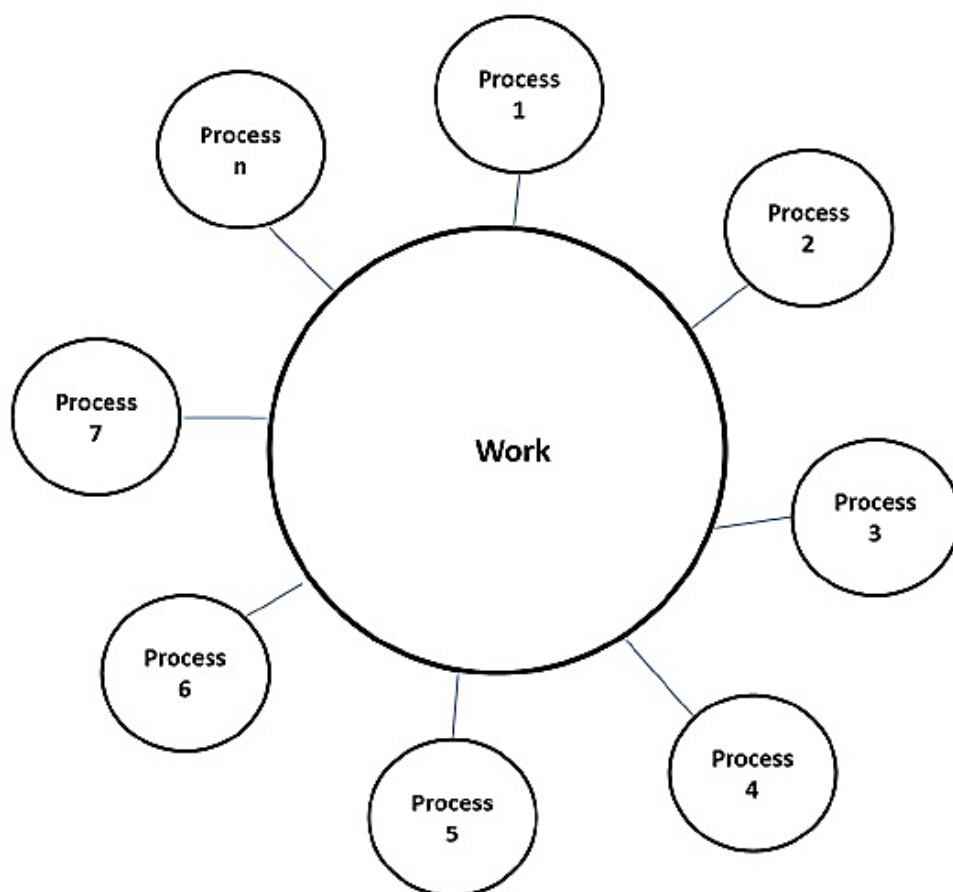
Маълумотларнинг параллел модел муаммоларининг бирламчи хусусияти шундан иборатки, маълумотлар параллеллигининг интенсивлиги масала ҳажми билан ортади ва бу ўз навбатида каттароқ муаммоларни ҳал қилиш учун кўпроқ жараёнлардан фойдаланиш имконини беради.

Вазифа граф моделида параллеллик вазифа графиги билан ифодаланади. Вазифалар графиги аҳамиятли ёки аҳамияtsiz бўлиши мумкин. Ушбу моделда вазифалар ўртасидаги корреляция маҳаллийликни тарғиб қилиш ёки ўзаро таъсир қилиш харажатларини минималлаштириш учун ишлатилади. Ушбу модел вазифалар билан боғлиқ бўлган маълумотлар миқдори улар билан боғлиқ ҳисоблашлар сонига нисбатан жуда катта бўлган муаммоларни ҳал қилиш учун қўлланилади. Вазифалар, улар орасида маълумотлар ҳаракати нархини яхшилашга ёрдам бериш учун тайинланган.



Бу ерда масалалар атом вазифаларига бўлинади ва граф сифатида амалга оширилади. Ҳар бир вазифа бир ёки бир нечта олдинги вазифага боғлиқ бўлган мустақил иш бирлигидир. Топшириқ бажарилгандан сўнг, кейинги топшириқнинг чиқишига боғлиқ вазифага ўтказилади. Кейинги вазифага эга қисм фақат олдинги вазифани тўлиқ бажарилгандан кейингина бажарилишини бошлайди. Графикнинг якуний натижаси охириги вазифа бажарилганда олинади.

Иш ҳовузи моделида вазифалар юкни мувозанатлаш жараёнларига динамик равишда берилади. Шундай қилиб, ҳар қандай жараён потенциал равишда ҳар қандай вазифани бажариши мумкин. Ушбу модел, вазифалар билан боғлиқ маълумотлар миқдори, вазифалар билан боғлиқ бўлган ҳисоблашдан нисбатан кичикроқ бўлганда қўлланилади.



Жараёнларга вазифаларни олдиндан белгилаш керак эмас. Вазифаларни белгилаш марказлаштирилган ёки марказлаштирилмаган. Вазифаларга кўрсаткичлар физик хотира рўйхатида, устувор навбатда, хеш жадвалида,

дарахтда сақланади ёки улар физик тақсимланган маълумотлар тузилмасида сақланиши мумкин.

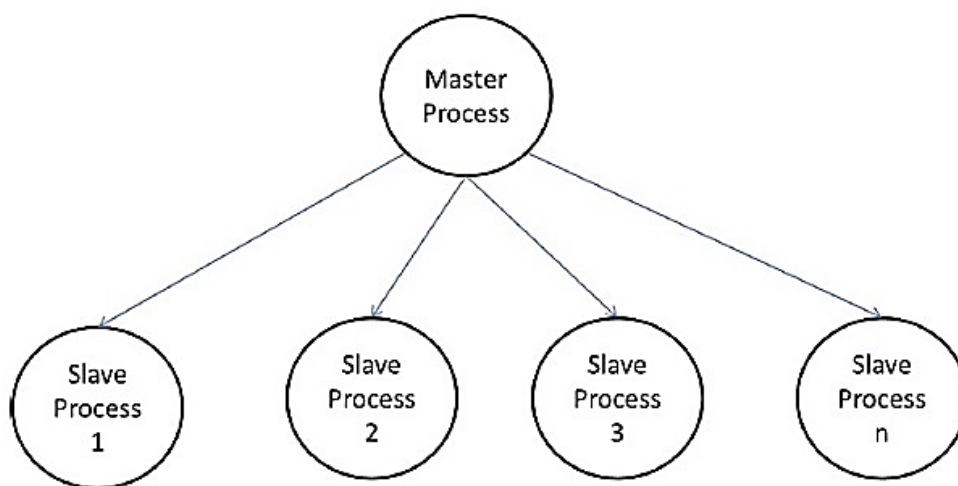
Вазифа бошида мавжуд бўлиши ёки динамик равишда яратилиши мумкин. Агар вазифа динамик равишда яратилса ва вазифани марказлаштирилмаган белгилаш амалга оширилса, у ҳолда тугатишни аниқлаш алгоритми талаб қилинади, шунда барча жараёнлар ҳақиқатда бутун дастурнинг тугалланганлигини аниқлай олади ва бошқа вазифаларни қидиришни тўхтатади.

Уста-ишчи моделида бир ёки бир нечта асосий жараёнлар вазифа ҳосил қилади ва уни тобе жараёнларга ажратади. Вазифалар, агар мавжуд бўлса, олдиндан тақсимланиши мумкин

- уста вазифалар ҳажмини тахмин қилиши мумкин ёки
- тасодифий тайинлаш юкни мувозанатлашнинг қониқарли ишни бажарилишига имкон яратиши мумкин,
- ишчига турли вақтларда кичикроқ топшириқлар берилади.

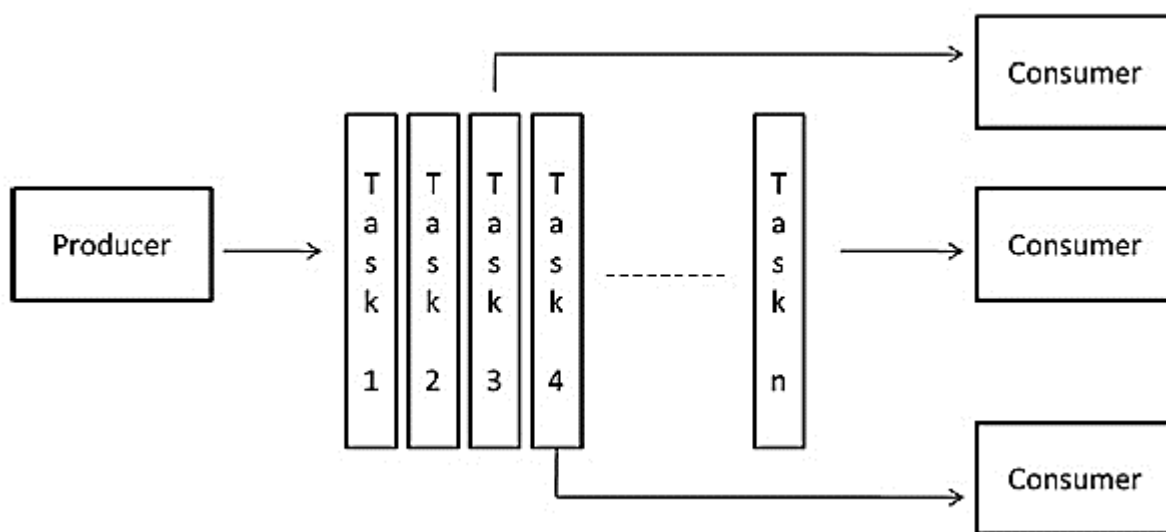
Ушбу модел одатда **умумий манзил-макон ёки хабарни узатиш парадигмаларига тенг даражада мос келади**, чунки ўзаро таъсир табиий равишда икки хил бўлади.

Баъзи ҳолларда вазифани босқичма-босқич бажариш керак бўлиши мумкин ва ҳар бир босқичдаги вазифа кейинги босқичлардаги вазифани яратишдан олдин бажарилиши керак. **Уста-ишчи модели иерархик ёки кўп даражали уста-ишчи моделига** умумлаштирилиши мумкин, бунда юқори даражадаги уста вазифаларнинг катта қисмини иккинчи даражали устага топширади, у эса вазифаларни ўз ишчилари орасида тақсимлайди.



Устанинг тирбандлик нуқтасига айланмаслигига ишонч ҳосил қилиш зарур. Агар вазифалар жуда кичик бўлса ёки ишчилар нисбатан тез бўлса, бу содир бўлиши мумкин. Вазифалар шундай танланиши керакки, вазифани бажариш нархи алоқа ва синхронизация нархидан устун бўлиши керак.

Ишлаб чиқарувчининг истеъмолчи ёки қувур линияси модели **ишлаб чиқарувчи-истеъмолчи модели** сифатида ҳам танилган. Бу ерда маълумотлар тўплами бир қатор жараёнлар орқали узатилади, уларнинг ҳар бири унда қандайдир вазифани бажаради. Бу ерда янги маълумотларнинг келиши навбатдаги жараён томонидан янги вазифанинг бажарилишини ҳосил қилади. Жараёнлар чизикли ёки кўп ўлчовли массивлар, дарахтлар ёки циклли ёки циклсиз умумий графиклар шаклида навбат ҳосил қилиши мумкин.



Ушбу модел ишлаб чиқарувчилар ва истеъмолчилар занжиридир. Навбатдаги ҳар бир жараённи кейинги жараён учун маълумотлар элементлари

кетма-кетлиги истеъмолчиси ва ундан кейинги жараён учун маълумотлар ишлаб чиқарувчиси сифатида ко‘риб чиқиш мумкин. Навбат чизиқли занжир бўлиши шарт эмас; йўналтирилган график бўлиши мумкин. Ушбу моделда қўлланиладиган энг кенг тарқалган ўзаро таъсирни минималлаштириш усули ҳисоблаш билан ўзаро таъсир қилишдир.

Муаммони ҳал қилиш учун бир нечта модел керак бўлганда **гибрид алгоритм** модели талаб қилинади. Бу модел иерархик равишда қўлланиладиган бир нечта моделлардан ёки параллел алгоритмнинг турли босқичларига кетма-кет қўлланиладиган бир нечта моделлардан иборат бўлиши мумкин.

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСАЛАР

Говак муҳитда нефтьнинг кўп ўлчавли филтрация масаласини ечишнинг самарали сонли усулларининг таҳлили қилиниб, қўйилган муаммоларни ҳал этишда керак бўладиган ахборот моделлари шакллантирилган.

Қўйилган масалаларни ечишда самарали ҳисоблаш усуллари ва алгоритмлари тоғрисида маълумотлар олинди ва уларнинг таҳлили қилинган.

Параллел ҳисоблашнинг турли дастур модуллари ва улардан унумли фойдаланиш йўллари кўриб чиқилган.

Боб бўйича таҳлиллар шуни кўрсатадики, кўп ўлчовли филтрация масалаларини ечишда уларнинг яхши самара берувчи ҳисоблаш алгоритмларини яратиш ва параллел ҳисоблаш жараёнларини ташкил этиш учун юқори тезликда ишловчи замонавий кўп процессорли компьютерлардан фойдаланиш зарур. Ушбу кўринишдаги компьютерлар қўйилган масалани ечиш жараёнини тезлаштиради ва нефть ёки газ конлари ишлашининг асосий кўрсаткичларини тез ҳисоблаш имкониятини яратади. Натижада, филтрация жараёнини унинг асосий кўрсаткичлари бўйича ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш асосида тез таҳлил ва башоратлаш имконини беради.

II БОБ. ГОВАК МУҲИТДА ИККИ ЎЛЧОВЛИ НЕФТЬ ФИЛЬТРАЦИЯ МАСАЛАСИНИ ЧЕКЛИ АЙИРМАЛИ УСУЛДА ЕЧИШНИНГ САМАРАЛИ ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ АЛГОРИТМЛАРИ

Замонавий ҳисоблаш технологиясининг ривожланиши параллел ҳисоблаш жараёнларини дастурлаш имконини беради. Бунинг учун маълум бир синфларга тегишли бўлган масалаларни ечишда қўлланиладиган, ҳисоблаш жараёнини тезлаштирадиган самарали ҳисоблаш алгоритмларни қуриш керак.

Физик жараёнларни ўрганишда математик моделлаштириш кенг қўлланилиши туфайли ҳозирги вақтда самарали сонли усулларни ишлаб чиқишга катта эътибор берилмоқда. Бундан ташқари, дифференциал тенгламаларга асосланган математик моделларни сонли усулларда ечиш ва ҳисоблаш асосан, чекли айирмали усул асосида амалга оширилади. Бунда, ечим изланаётган соҳанинг вертикал ва горизонтал йўнилиши бўйича сеткадаги нуқталар сони муҳим аҳамиятга эга. Бундай муаммоларни ҳал қилиш учун юқори самарали ҳисоблаш тизимларидан фойдаланиш талаб этилади.

Параллел ҳисоблашни қўллаш мисолларидан бири сифатида кўпинча нефть ва газ конларини ўзлаштиришни сонли тадқиқ қилиш ва башоратлаш қаралади. Ҳисоб-китоблар тизимли тармоқлардаги бир неча миллион тугунларни бирлаштиради ва ушбу ҳисоб-китоблар асосида башоратлар қилиш мумкин.

Ошкор ёки ошкормас схемалардан фойдаланиш филтрация жараёнини тавсифловчи дифференциал тенгламанинг интеграллаш босқичининг қийматига чеклов қўяди, унинг қиймати чизиқли равишда сетка қадамининг ўлчамига боғлиқ. Шу сабабли, кетма-кет ва параллел ҳисоблашлардан фойдаланилганда чекли айирмали схемаларнинг юқори самарадорлигига қарамай, юқори фазовий рухсатга эга филтрация жараёнларини ўрганиш учун математик моделларни куриш ва қўллашда бундай чекли айирмали схемалар ўз афзалликларини йўқотади. Ошкормас чекли-айирмали схемалар мутлақо турғун, аммо фойдаланиладиган математик моделларнинг чизиқли бўлмаганлиги сабабли уларда тенгламалар тизимини ечишнинг сонли усулидан фойдаланилади. Нефть ва газ конларини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини сонли башорат қилишда қўлланиладиган тўғри ташкил этилган ошкормас чекли айирмали схемаларидан бири, кўндаланг-кесим схемаси учун чекли айирмалар усули ҳисобланади [1,8].

Ушбу усул мақсади, тақсимланган хотирага эга кўп процессорли ҳисоблаш тизимида ошкормас чекли-айирмали схемаси (кўндаланг-кесим

схема) асосида икки ўлчовли параболик тенгламани сонли ечишнинг самарали параллел ҳисоблаш алгоритмини қуришдан иборат.

Маълумки, бир ўлчовли математик моделни қўллаш учун уни параболик типдаги дифференциал тенгламалар ёрдамида чегаравий масалалар кўринишида ифодалаймиз ва бу дифференциал тенгламаларни сонли ечишда ошкор чекли айирмалар кўринишида бажарилади. Бу эса, ўз навбатида, чизиқли тенгламалар тизимини ечишга олиб келади. Маълумки, чекли айирмали тенгламаларни сонли ечишнинг бир қанча сонли усуллари мавжуд. Масалан, учрашув ҳайдаш (Встречная прогонка) усули параллел ҳисоблаш имкониятини беради [].

Биринчи босқичда тўғри ҳайдаш коэффициентлари α_i, β_i ($i=1,2,\dots,\bar{n}$) ҳисоблаб чиқилади. Иккинчи босқичда ξ_i, η_i ($i=\bar{n}, \bar{n} + 1, \dots, n$), тесқари ҳайдаш коэффициентлари ҳисобланади. Бу ерда $\bar{n} = \frac{n}{2}$. Ҳисобланиши керак бўлган P_i функцияси қийматларини тесқари тартибда ҳисоблаш ҳам худди шу тарзда параллел равишда амалга оширилади. Бунда параллел ҳисоблаш икки босқичда \bar{n} нуқтадан биринчи нуқтага ва \bar{n} нуқтадан n нуқтага қадар амалга оширилади. Параболик типдаги дифференциал тенгламалар учун қурилган чегаравий масалани ечиш учун параллел алгоритмлар ва ҳисоблашлар бажарилади [3,6].

Параллел ҳисоблаш алгоритмлари ва ҳисоблаш усулларини қўллаш натижасида, ҳисоб-китобларни бажаришда дастурнинг ишлаш вақтини бир неча мартага қисқартириш мумкин. Масалан, координата чизиқлари бўйлаб қадамлар сонининг ортиши билан икки ва уч ўлчовли параболик тенгламалар кўп вақтни талаб қилади [4,5]. Бундай катта ҳисоблашлар вақтини камайтириш учун параллел ҳисоблашлар алгоритмини ишлаб чиқиш зарур.

2.1. Ғовак мухитда нефть филтрацияси жараёни чегаравий масаласининг икки ўлчовли математик модели

Математик модел. Ғовак мухитларда нефть филтрация жараёнининг ўтказилган тадқиқотлари шуни кўрсатдики, чуқур зоналарда қудуқлар галереясининг интенсив ишлаши натижасида, қатлам тизимларининг нефть бериш даражаси пасаяди. Шу билан бирга, бундай тенгламаларга асосланган ушбу жараёнларни математик моделлаштириш, фойдаланиладиган ҳисоблаш мосламасининг мақбул иш вақти учун батафсил чекли-айирмали тўрларда амалга оширилиши керак. Бундай муаммоларни ҳал қилиш учун нефть конларини ўзлаштиришнинг адекват математик моделлари, асосий кўрсаткичларини ҳисоблашнинг самарали алгоритмларини яратиш ва уларни қўллашда юқори самарали ҳисоблаш тизимларидан фойдаланиш долзарбдир. Шубҳасиз, бундай самарали ҳисоблаш алгоритмлари ғовак мухитда нефтьнинг филтрация жараёнини, унинг асосий кўрсаткичлари бўйича тадқиқ қилишда муҳим рол ўйнайди.

Ғовак мухитда нефтьнинг ностационар филтрацияси жараёнининг икки ўлчовли математик модели умумий ҳолда қуйидаги параболик типдаги тенглама билан тавсифланади:

$$\beta h(x, y) \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - Q, \quad (x, y) \in G \quad (2.1)$$

Нефть конларини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини аниқлашда (2.1) дифференциал тенглама қуйидаги бошланғич ва чегаравий шароитларда ечилади:

$$P(x, y, t) = P_H(x, y), \quad t = 0,$$

$$-\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha (P_A - P) \quad (x, y) \in \Gamma, \quad (2.3)$$

$$\int_{s_{i_q}} \frac{k(x, y)h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t), \quad (x, y) \in s_{i_q}, \quad i_q = \overline{1, N_q}. \quad (2.4)$$

$$Q = \sum_{i,j=1}^{N_q} \delta_{i,j} q_{i,j}$$

Бу ерда:

P - қатламдаги босим;

P_H - қатламнинг дастлабки босими;

P_A - чегарадаги босими;

μ - нефтьнинг динамик қовушқоқлиги;

k - қатлам ўтказувчанлик коэффициентлари;

h - қатлам қалинлиги;

β - қатлам эластиклик коэффициентлари, $\beta = m^* \beta_N + \beta_M$;

β_N - нефтьнинг сиқилиш коэффициентлари;

β_M - мухитнинг сиқилиш коэффициентлари;

q_{i_q} - i_q -чи қудуқнинг дебити;

s_{i_q} - i_q - қудуқнинг контури;

n - Γ чегарасига ички нормал;

N_q - қудуқлар сони;

M - ғоваклик коэффициентлари;

δ - Дирак функцияси;

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{chegara yoriq,} \\ 1, & \text{chegara ochiq.} \end{cases}$$

(2.1)-(2.4) чегаравий масалани чекли айирма усулида ечиш учун қуйидаги ўлчовсиз ўзгарувчиларни киритамиз:

$$P^* = P / P_0; \quad x^* = x / L; \quad y^* = y / L; \quad k^* = k / k_0; \quad h^* = h / h_0;$$

$$\tau = \frac{k_0 t}{\beta \mu L^2}; \quad q^* = \frac{q \mu}{\pi k_0 P_0 h_0}.$$

Бу ерда

P_0 - характеристик катталиқдаги босим қиймати;

k_0 - характеристик катталиқ, қатлам ўтказувчанлигининг энг катта қиймати;

h_0 - қатлам қалинлигининг характерли қиймати;

$h_0 = \max(h(x, y))$;

L - характерли узунлик.

Кейинчалик, соддалаштириш учун тенгламалардаги “*” қўйилмайди.

Кейин, буни ҳисобга олган ҳолда, ўлчовсиз ўзгарувчилардаги (2.1)-(2.4) масалалар қуйидагича қайта ёзилади:

$$h \frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k h \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k h \frac{\partial P}{\partial y} \right) - \sum_{i=1}^{n_q} q_i \delta(x - x_i, y - y_i)$$

$$P(x, y, t) = P_H(x, y), \quad t = 0, \quad (x, y) \in G$$

$$-k h \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_A - P), \quad (x, y) \in \Gamma, \quad (2.7)$$

Чегаравий (2.6), (2.7) шартлар билан (2.5) дифференциал тенгламани тавсифловчи ғовакли муҳитда нефть филтрациясининг ўлчовсиз чегаравий масаласи (2.5)-(2.7) кўндаланг-кесим ошкормас схемасидан фойдаланилган чекли-айирмали усулида ечилади.

2.2. Икки ўлчовли нефть фильтрация чегаравий масаласини сонли моделлаштириш

Дискрет моделни яратиш. (2.5)-(2.6) масалани сонли ечиш учун $\Delta x = \Delta y$ бир хил қадам билан қуйидаги квадрат тўр соҳасини қураимиз:

$$\Omega_{xy\tau} = \left\{ (x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, \tau_l = l\Delta\tau); i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}, l = \overline{0, N_\tau}, \Delta\tau = \frac{1}{N_\tau} \right\}.$$

Ушбу соҳада чекли айирмали масалани қуриш учун ошқормас ўзгарувчилар йўналиши схемасининг (кўндаланг-кесим схемаси) алгоритмик ғояси қўлланилади[8,9]. l -чи вақт қатлампдан $l+1$ қатламга ўтиш $0.5\Delta\tau$ қадам билан икки босқичда амалга оширилади. Натижада юқоридаги (2.5) тенглама иккита чекли айирмали тенгламалар тизимини кетма-кет ечишга келади. У ҳолда бу тенгламаларни ички тугунлар учун $l+0,5$ ва $l+1$ вақт қатламида қуйидаги шаклда ёзиш мумкин:

$$h_{i,j} \frac{P_{i,j}^{l+1/2} - P_{i,j}^l}{\Delta\tau/2} = \frac{T_{i-0.5,j} P_{i-1,j}^{l+1/2} - (T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j}) P_{i,j}^{l+1/2} + T_{i+0.5,j} P_{i+1,j}^{l+1/2}}{\Delta x^2} +$$

$$+ \frac{T_{i,j-0.5} P_{i,j-1}^l - (T_{i,j-0.5} + T_{i,j+0.5}) P_{i,j}^l + T_{i,j+0.5} P_{i,j+1}^l}{\Delta y^2} - \delta_{i,j} q_{i,j},$$

$$h_{i,j} \frac{P_{i,j}^{l+1} - P_{i,j}^{l+1/2}}{\Delta\tau/2} = \frac{T_{i-0.5,j} P_{i-1,j}^{l+1/2} - (T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j}) P_{i,j}^{l+1/2} + T_{i+0.5,j} P_{i+1,j}^{l+1/2}}{\Delta x^2} +$$

$$+ \frac{T_{i,j-0.5} P_{i,j-1}^{l+1} - (T_{i,j-0.5} + T_{i,j+0.5}) P_{i,j}^{l+1} + T_{i,j+0.5} P_{i,j+1}^{l+1}}{\Delta y^2} - \delta_{i,j} q_{i,j},$$

бу ерда

$$T_{i,j,r} = k_{i,j} h_{i,j};$$

$$T_{i-0.5,j} = \frac{T_{i-1,j} + T_{i,j}}{2}; \quad T_{i+0.5,j} = \frac{T_{i,j} + T_{i+1,j}}{2}; \quad T_{i,j-0.5} = \frac{T_{i,j-1} + T_{i,j}}{2}.$$

Ҳар бир $x = x_i$ нуқтада босим $P_{i,j}^{l+1/2}$ қийматини $l+1/2$ - вақт қатламида етарли аниқлик билан ҳисоблаш учун юқоридаги (2.7) чегаравий шартдан фойдаланиниб қуйидаги уч нуқтали тенгламалар тизимини ечамиз:

$$\begin{cases} (3 - 2\Delta x L\alpha) P_{0,j}^{l+1/2} - 4P_{1,j}^{l+1/2} + P_{2,j}^{l+1/2} = -2\Delta x L\alpha P_A, \\ a_i P_{i-1,j}^{l+1/2} - b_i P_{i,j}^{l+1/2} + c_i P_{i+1,j}^{l+1/2} = -d_i, \quad i, j = 1, 2, \dots, N-1, \\ (3 - 2\Delta x L\alpha) P_{N,j}^{l+1/2} - 4P_{N-1,j}^{l+1/2} + P_{N-2,j}^{l+1/2} = 2\Delta x L\alpha P_A. \end{cases} \quad (2.8)$$

бунда $a_i = T_{i-0.5,j}$, $b_i = T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j} + h_{i,j} \frac{\Delta x^2}{\Delta \tau / 3}$, $c_i = T_{i+0.5,j}$,

$$d_i = \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \left[T_{i,j-0.5} P_{i,j-1}^l - (T_{i,j-0.5} + T_{i,j+0.5}) P_{i,j}^l + T_{i,j+0.5} P_{i,j+1}^l \right] + h_{i,j} \frac{\Delta x^2}{\Delta \tau / 2} P_{i,j}^l - \Delta x^2 \delta_{i,j} q_{i,j}.$$

(2.8.) тенгламалар тизими x ўзгарувчилар йўналиши бўйича ҳайдаш усули билан ечилади.

Худди шундай тизимнинг иккинчи тенгламасини $l+1$ вақт қатлами учун юқоридаги (2.8) чекли айирмалли тенглама каби ёзамиз

$$\begin{cases} (3 - 2\Delta y L\alpha) P_{i,0}^{l+1} - 4P_{i,1}^{l+1} + P_{i,2}^{l+1} = -2\Delta y L\alpha P_A, \\ a_j P_{i,j-1}^{l+1} - b_j P_{i,j}^{l+1} + c_j P_{i,j+1}^{l+1} = -d_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, N-1, \\ (3 - 2\Delta y L\alpha) P_{i,N}^{l+1} - 4P_{i,N-1}^{l+1} + P_{i,N-2}^{l+1} = 2\Delta y L\alpha P_A. \end{cases} \quad (2.9)$$

бунда $a_j = T_{i,j-0.5}$, $b_j = T_{i,j-0.5} + T_{i,j+0.5} + h_{i,j} \frac{\Delta y^2}{\Delta \tau / 2}$, $c_j = T_{i,j+0.5}$,

$$d_j = \frac{\Delta y^2}{\Delta x^2} \left[T_{i-0.5,j} P_{i-1,j}^{l+1/2} - (T_{i-0.5,j} + T_{i+0.5,j}) P_{i,j}^{l+1/2} + T_{i+0.5,j} P_{i+1,j}^{l+1/2} \right] + h_{i,j} \frac{\Delta y^2}{\Delta \tau / 2} P_{i,j}^{l+1/2} - \Delta y^2 \delta_{i,j} q_{i,j}.$$

бу ерда

$P_{i,j}^l$ - l -чи вақт қатламидаги босим қиймати;

$P_{i,j}^{l+0.5}$ - $l+0,5$ -вақт қатламидаги босим қиймати.

(2.8) ва (2.9) тенгламалар тизимининг характерли томони шундаки, улар уч диагоналли матрицага эга. Бу ҳолат ечим топишда оралиқ $l+1/5$ ва $l+1$ -вақт босқичларида ҳайдаш усулидан фойдаланиш имконини беради.

Шундай қилиб, ўзгарувчилар йўналиши схемаси ва ҳайдаш усули бўйича чекли айирмали тенгламалар тизимлари тузилади ва ечилади. Бундай ҳолда, биринчи навбатда, Ox ўқи бўйлаб тўр майдонининг ҳар бир чизигида ҳайдаш усули амалга оширилади ва масаланинг оралиқ ечими $l+0,5$ - вақт қатламида топилади. Шундан сўнг (2.8) тенгламалар тизими худди шундай ечилади. Бу ерда олинган ечим керакли бўлиб, $l+1$ -чи вақт нуқтасига тўғри келади. Бу икки чекли-айирмали тенгламалар тизимини ечишда яқинлашув аниқлик даражаси $O(\tau + \Delta x^2 + \Delta y^2)$ каби бўлади.

2.3. Ғовак муҳитда нефтнинг икки ўлчовли фильтрация чегаравий масаласини сонли ечишнинг параллел ҳисоблаш алгоритминини ишлаб чиқиш

Параллел ҳисоблаш алгоритмининг математик ва схематик тавсифи. Баён қилинадиган параллел ҳисоблаш алгоритми ўзгарувчилар йўналишлари схемаси (кўндаланг кесим схемаси) ва учрашув-ҳайдаш усули ғоясига асосланади. Маълумки, чап ва ўнг ҳайдаш усули комбинацияси учрашув-ҳайдаш усулини беради, бу эса икки оқимга параллеллаштириш имконини беради. Бундай ҳолда, чекли-айирмали тизим иккита оқим ўртасида бўлинади - биринчиси $1 \leq i \leq \bar{n}$, иккинчиси $\bar{n} \leq i \leq n$ (бу ерда $\bar{n} = (n+1)/2$, n тоқ сон). Бу ерда \bar{n} - олдинга силжишнинг иккита шохлари "юқорида" ва "пастда" "учрашадиган" тенгламанинг сони.

Юқоридаги белгилашлар орқали, қарама-қарши йўналишда, биринчи навбатда, унинг олдинга силжиши амалга оширилади - коэффициентлар "юқоридан" ҳисобланади:

Усулни бажариш кетма-кетлиги қуйидагича:

1. Олдинга ҳайдаш ишга туширилади (тўғри юриш билан):

$$\alpha_1 = \mathbf{b}_0 / \mathbf{c}_0, \quad \beta_1 = \mathbf{f}_0 / \mathbf{c}_0,$$

$$\xi_N = \mathbf{a}_N / \mathbf{c}_N, \quad \eta_N = \mathbf{f}_N / \mathbf{c}_N.$$

2. Олдинга юриш қуйидаги формулаларни ҳисоблаш орқали кетма-кет бажарилади:

$$\alpha_{i+1} = \mathbf{b}_i / (\mathbf{c}_i - \mathbf{a}_i \alpha_i), \quad i=1, 2, \dots, m-1.$$

$$\beta_{i+1} = (\mathbf{f}_i + \mathbf{a}_i \beta_i) / (\mathbf{c}_i - \mathbf{a}_i \alpha_i), \quad i=1, 2, \dots, m-1.$$

$$\xi_i = \mathbf{a}_i / (\mathbf{c}_i - \mathbf{b}_i \xi_{i+1}), \quad i=N-1, N-2, \dots, m.$$

$$\eta_i = (\mathbf{f}_i + \mathbf{b}_i \eta_{i+1}) / (\mathbf{c}_i - \mathbf{b}_i \xi_{i+1}), \quad i=N-1, N-2, \dots, m.$$

3. Тескари ҳайдаш ишга туширилади:

$$p_m = (\eta_m + \xi_m \beta_m) / (1 - \xi_m \beta_m).$$

$$p_{m-1} = (\beta_m + \alpha_m \eta_m) / (1 - \xi_m \beta_m).$$

4. Тескари ҳайдашда қуйидаги формулалар кетма-кет бажарилади:

$$p_i = (\alpha_{i+1} p_{i+1} + \beta_{i+1}), \quad i=m-2, \dots, 1, 0.$$

$$p_{i+1} = (\xi_{i+1} p_i + \eta_{i+1}), \quad i=m, m+1, \dots, N-1.$$

Тўғридан-тўғри ҳаракат формулаларида бир хил ифода билан бўлиниш жуфтлари мавжуд. Уларни ўзаро ҳисоблаб, кейин кадамда ушбу рақамларга кўпайтириш орқали алмаштириш мумкин.

Одатда берилган орқага ўтиш формулаларида p_{m-1} компоненти учун формула йўқ, бу эса кейинроқ тескари ишда ҳисобланади. Бироқ, бу ўзгарувчилар сони жуфт бўлган тақдирда ҳам графикнинг критик йўлини узайтиради, p_{m-1} ни ҳисоблашни y_m аллақачон ҳисобланган пайтгача кечиктиради, иккала компонент бир вақтнинг ўзида бир-биридан деярли мустақил равишда ҳисобланиши мумкин ва ўзгарувчиларнинг сони тоқ бўлса,

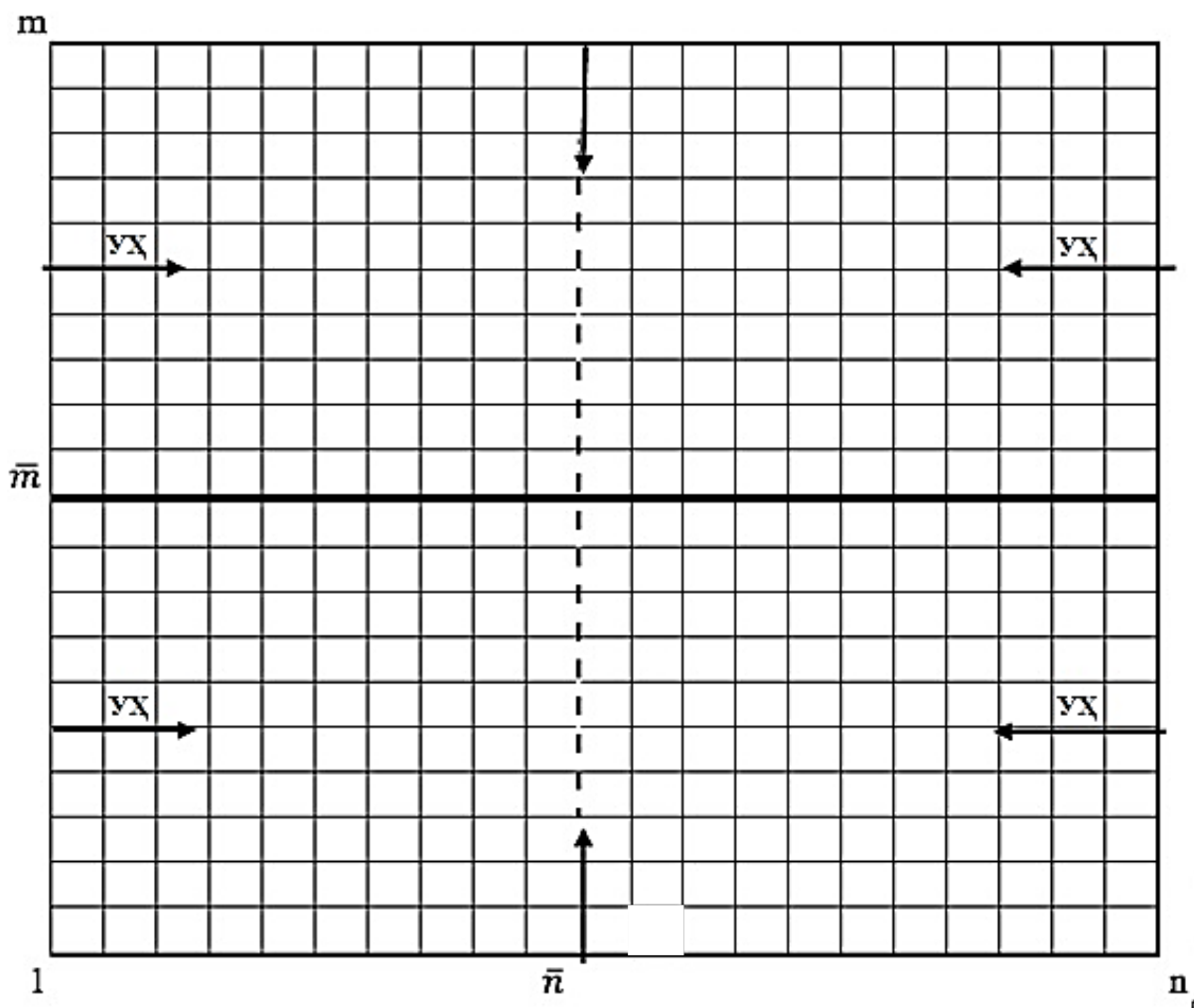
“учрашув нуктасида” ҳисоб-китоблар учун коэффициентларнинг битта қўшимча ҳисобини "юқорида" ёки "пастда" кутиш керак.

Шунинг учун кейинги манбаларда тоқ сонли номаълумлар учун мақбулрок формулалар берилган. Уларда тескари ҳаракатнинг бошланиши қуйидаги формула билан алмаштирилади (бизнинг белгилашимизда):

$$p_m = (f_m + b_m \eta_{m+1} + a_m \beta_m) / (c_m - a_m \alpha_m - b_m \xi_{m+1})$$

Энди икки ўлчовли масалалар учун параболик типдаги тенгламаларни ҳисоблашнинг параллел алгоритмини кўриб чиқамиз. Бу ерда маълумки, чекли айирмали тенгламалар учун кўндаланг-кесим схемалар қўлланилади. Параллел ҳисоблаш жараёнини ташкил қилиш учун $l+0,5$ ярим вақт қатлами, қарама-қарши ишнинг ҳисоблаш майдони 1-нуқтадан \bar{m} гача ва m -нуқтадан \bar{m} нуқтага қадар икки қисмга бўлинади.

2.1-расмда параллел ҳисоблашнинг алгоритмик схемасида ҳайдаш усулининг кўндаланг кесим бўйича юриши схематик шаклда кўрсатилган. Ҳисоблаш схемаси $l+0,5$ вақт қатлами учун келтирилган.



2.1-расм. $l+0,5$ вақт қатлами учун параллел ҳисоблаш
алгоритмик схемаси

Ушбу параллел ҳисоблаш схемасида ҳар бир йўналишда x_i ўзгарувчиси орқага қараб, y_j ($j = 1, 2, \dots, \bar{m}$) ўзгарувчиси бўйлаб ҳаракатланади ва y_j ($j = m, m-1, \dots, \bar{m}$) га параллел бўлади.

Алгоритмик схемадаги ишлатилган белгилар қуйидагиларни кўрсатади:

m - y ўзгарувчиси бўйича нуқталар сони;

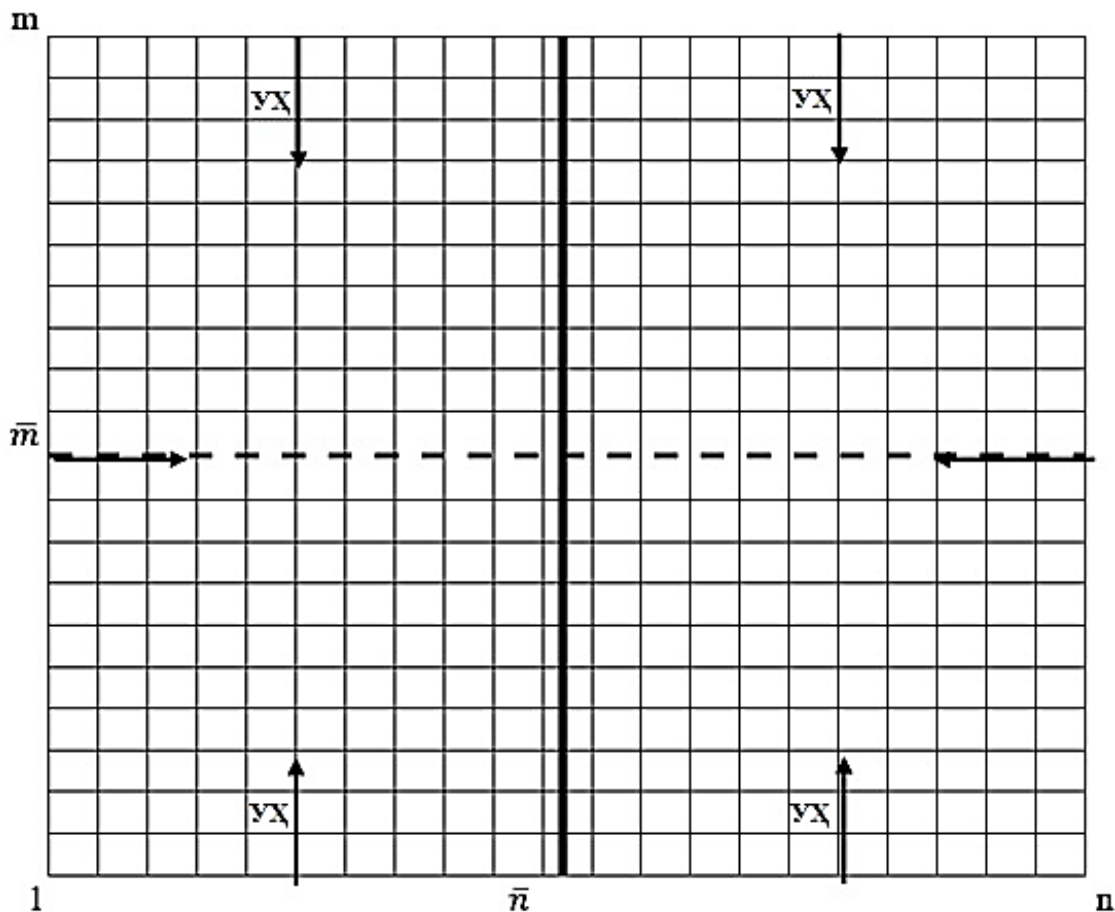
n - x ўзгарувчиси бўйича нуқталар сони;

yx - Учрашув-ҳайдаш усулининг қўлланилиши (Встречная прагонка);

\bar{m} - y ўқи йўналишдаги марказий нуқта $\bar{m} = \frac{m+1}{2}$;

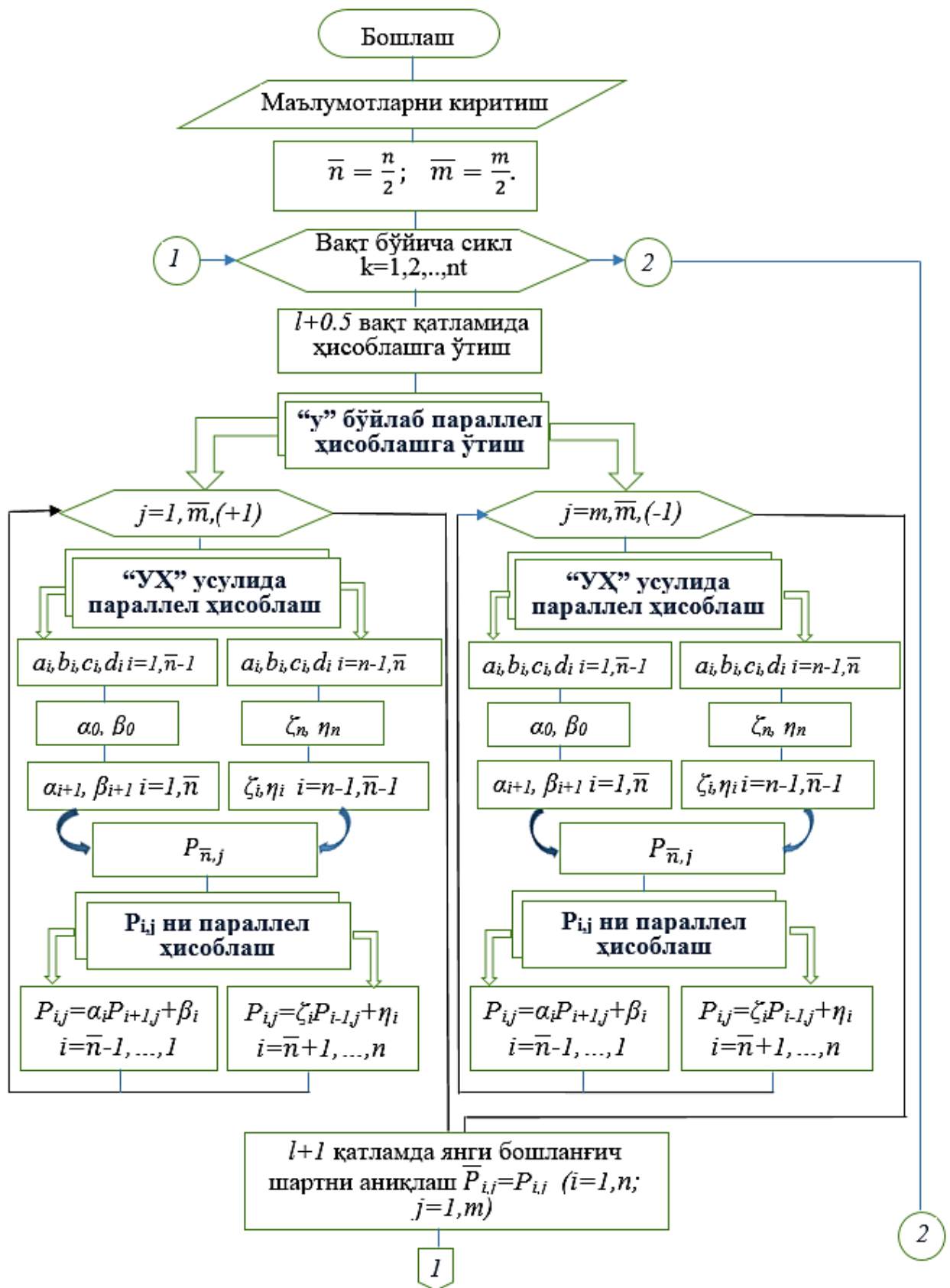
\bar{n} - x ўқи йўналишидаги марказий нуқта $\bar{n} = \frac{n+1}{2}$.

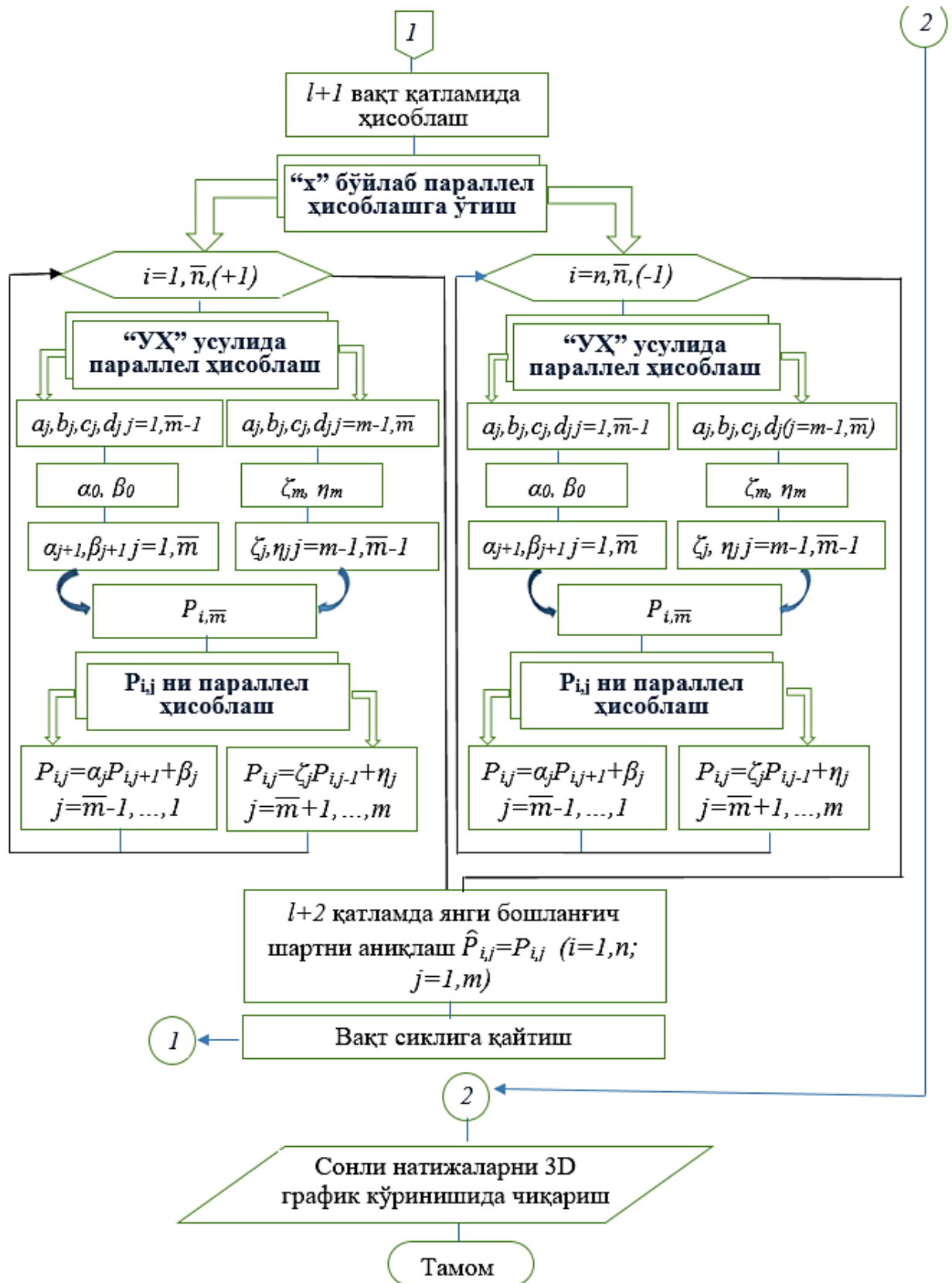
$l+1$ – вақт қатлами учун параллел ҳисоблаш алгоритмик схемаси куйидаги шаклда бўлади (2.2-расм).



2.2-расм. $l+1$ вақт қатлами учун параллел ҳисоблаш алгоритмик схемаси

Бу ерда ҳам ҳисоблаш схемаси ($l+1$ вақт қатлами учун) кўндаланг кесим схемаси бўйича амалга оширилади. Ушбу параллел ҳисоблаш схемасида ҳар бир йўналишда y_n ўзгарувчиси орқага қараб, x_i ($i = 1, 2, \dots, \bar{n}$) ўзгарувчиси бўйлаб ҳаракатланади ва x_i ($i = n, n-1, \dots, \bar{n}$) га параллел бўлади. Кўндаланг кесим схемасига асосланган параллел ҳисоблаш алгоритмининг блок-схемаси чизмаси 2.3-расмда келтирилган.





2.3-расм. Кўндаланг-кесим схемага асосланган самарали параллел ҳисоблаш алгоритми блок-схемаси

Нефть кони филтрацияси 2 ўлчовли чегаравий масаласини ечиш учун ишлаб чиқилган сонли усул ва алгоритм асосида шуни айтишимиз мумкинки, ушбу усул ёрдамида суюқликлар филтрацияси чегаравий масалаларини ечишда соҳани икки қисмга ажратиб кўндаланг кесим схемаси орқали ҳисоблаш биринчидан, ҳисоблашлар сонини камайтиради, иккинчидан, бу орқали ҳисоблаш жараёнида параллел ҳисоблашни ташкил қилиш мумкин бўлади. Бу эса яратилган параллел алгоритм асосида дастурий таъминот ишлаб чиқилганда дастурий маҳсулотни осонлик билан параллеллаштириш имконини беради. Учрашув ҳайдаш усулини мақсадли ва самарали қўллаш орқали сонли ҳисоблашлар тезлашишини ҳисоблаш жараёнларида тажриба қилиб кўрилди.

Умуман олганда, ушбу кўринишдаги тенгламаларни ечишга сҳекли айирмали ва учрашув-ҳайдаш усулини мақсадли қўллаш ишни самарали ташкил қилиш ва натижаларни тез ва кам хатоликларда олиш имкониятларини оширади. Шу жумладан улар ғовак муҳитида нефть ва газ қатламлари филтрацияси икки ва уч ўлчовли масалаларини ҳал қилиш учун самарадордир.

2.4. Ҳисоблаш самарадорлигини баҳолаш ҳамда сонли натижаларни визуал формада тақдим этиш

Ҳисоблаш тажрибалари. Нефть конлари ишлашида филтрация жараёнининг асосий кўрсаткичларини ҳисоблашда кетадиган вақт филтрация дискрет соҳасининг ўлчамига, яъни ундаги x ва y ўқларининг нуқталари сонига ва ҳисоблаш вақтига боғлиқдир. Агар дискрет соҳада ҳар бир йўналиш бўйича нуқталар сони кўп бўлса ва ҳисоблаш вақти, яъни нефть кони ишлашининг бир неча йиллик кўрсаткичларини ҳисоблаш зарур бўлса, u ҳолда дастур тўлиқ ишлаши учун жуда катта вақтни талаб этади. Бунда ҳисоблаш жараёнини камайтириш, асосан, параллел ҳисоблаш алгоритмларини ва уларга мос

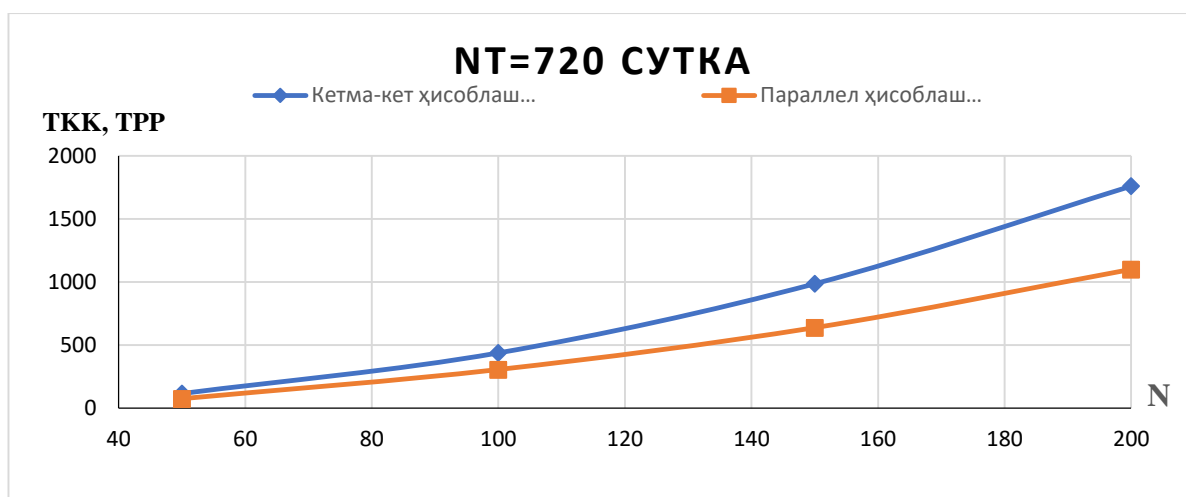
дастурий модулларни яратиш ҳамда ундан самарали фойдаланиш орқали амалга оширилади.

Алгоритмда учта асосий сиклдан фойдаланилган. Биринчи k -сикл вақтни ўзгартиришни билдиради, иккинчи i ва учинчи j сикллари x ва y нукта ўзгарувчилари йўналиши бўйича такрорлашни англатади. Шунинг учун координата чизиқларининг нукталари сони ва умумий ҳисоблаш вақти бўйича ҳисоблаш тажрибалари ўтказилган. Биринчи ва иккинчи ҳисоблаш тажрибалари координата ўқларидаги нукталар сони (50,50), (100,100), (150,150) ва (200,200) бўлганда ҳисоблаш жараёни 360 ва 1080 суткаларда ўтказилган (2.4, 2.5 -расмлар), иккинчи тажриба эса 360, 720, 1080, 1440 сутка вақтида координата ўқларидаги нукталар сони (50,50), (100,100) бўлганда ўтказилган (2.6, 2.7-расмлар).

2.4, 2.5 –расмларлардан кўришиб турибдики параллел ҳисоблаш алгоритми дискрет филтрация соҳаси ўлчамлари ошиши билан кетме-кет ҳисоблаш алгоритмига қараганда анча самарадорлиги ошиб боради. Худди шундай ҳисоблаш вақтининг ошишида ҳам самарадорликнинг ошиши кузатилмоқда.

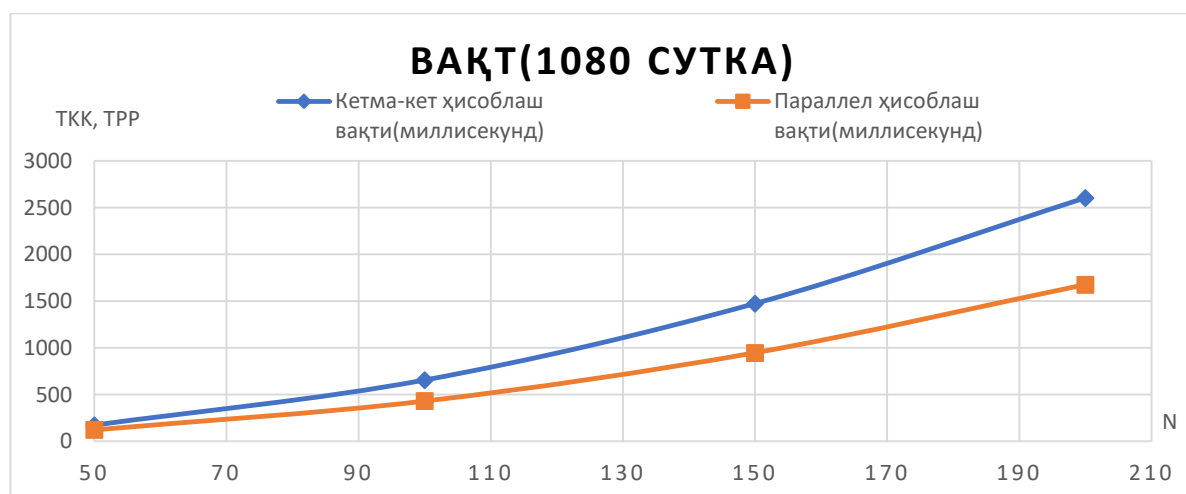
Расмлардаги жадвал ва графиклардан кўришиб турибдики, дастур параллел ҳисоблаш алгоритми (2.3-расм) ёрдамида ишлаётганида ҳисоблаш самарадорлиги иккала ҳисоблаш тажрибаларида ҳам 45-50% дан кўпроқни ташкил қилади ва дастурнинг бир ярим марта тез ишлашини таъминлайди.

Вақт(720 сутка)			
Нукталар сони	Кетма-кет ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Параллел ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Ҳисоблаш самарадорлиги
50	117	75	1,56
100	439	306	1,43
150	987	638	1,55
200	1761	1100	1,60



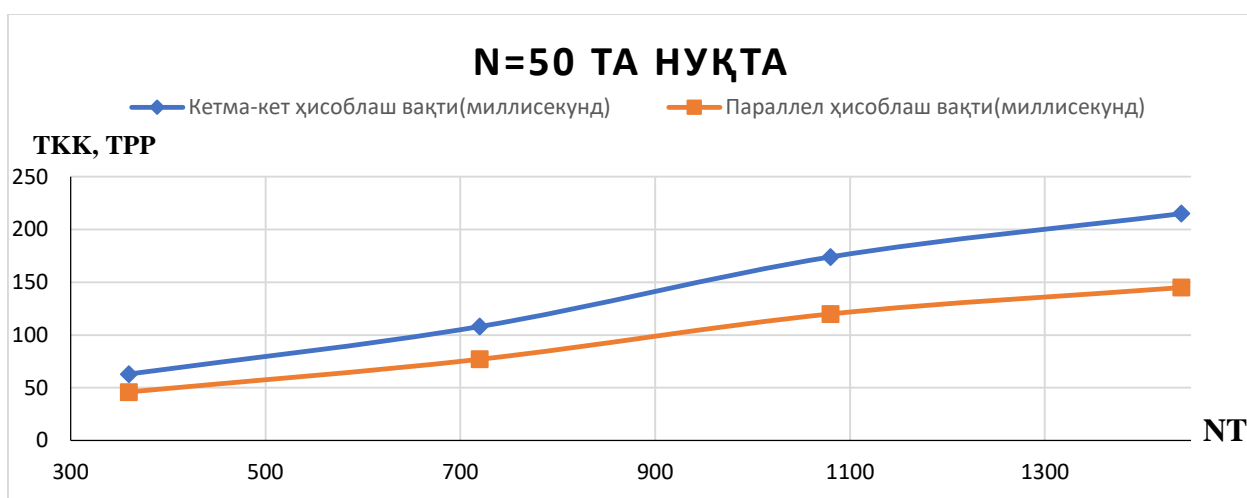
2.4-расм. Координата чизиқлари нуқталари сони бўйича 720 кунлик вақтдаги ишлаш натижалари.

Вақт(1080 сутка)			
Нуқталар сони	Кетма-кет ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Параллел ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Ҳисоблаш самарадорлиги
50	173	123	1,41
100	655	431	1,52
150	1473	947	1,56
200	2603	1675	1,55



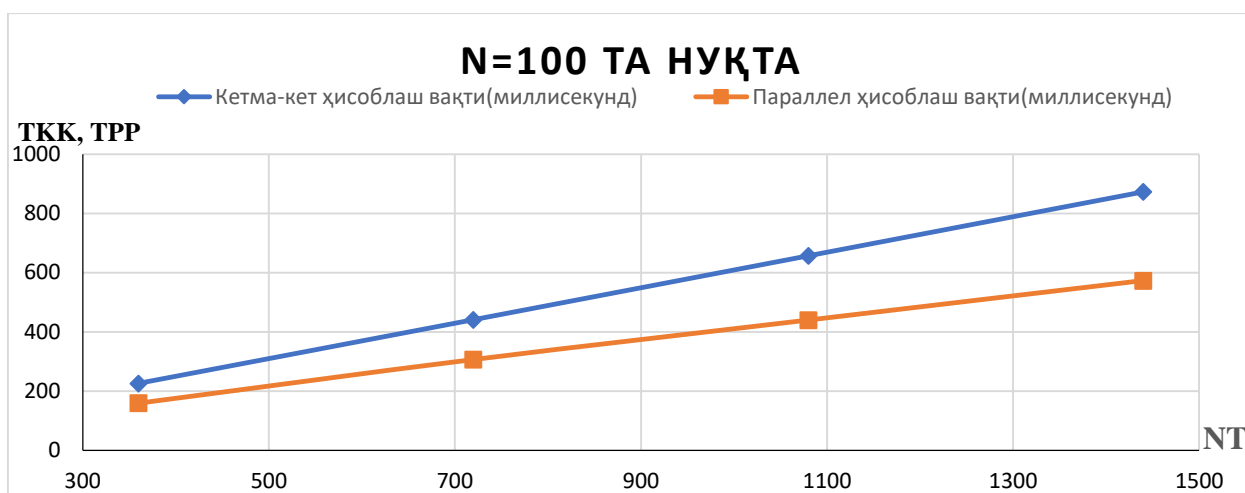
2.5-расм. Координата чизиқлари нуқталари сони бўйича 1080 кунлик вақтдаги ишлаш натижалари.

n=50 та нуқта			
Нуқталар сони	Кетма-кет ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Параллел ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Ҳисоблаш самарадорлиги
360	63	46	1,37
720	108	77	1,40
1080	174	120	1,45
1440	215	145	1,48



2.6-расм. Нуқталар сони $p_x=50$, $p_y=50$ бўлганда ҳисоблаш вақти натижалари

n=100 та нуқта			
Нуқталар сони	Кетма-кет ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Параллел ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Ҳисоблаш самарадорлиги
360	226	160	1,41
720	441	307	1,44
1080	657	440	1,49
1440	873	573	1,52

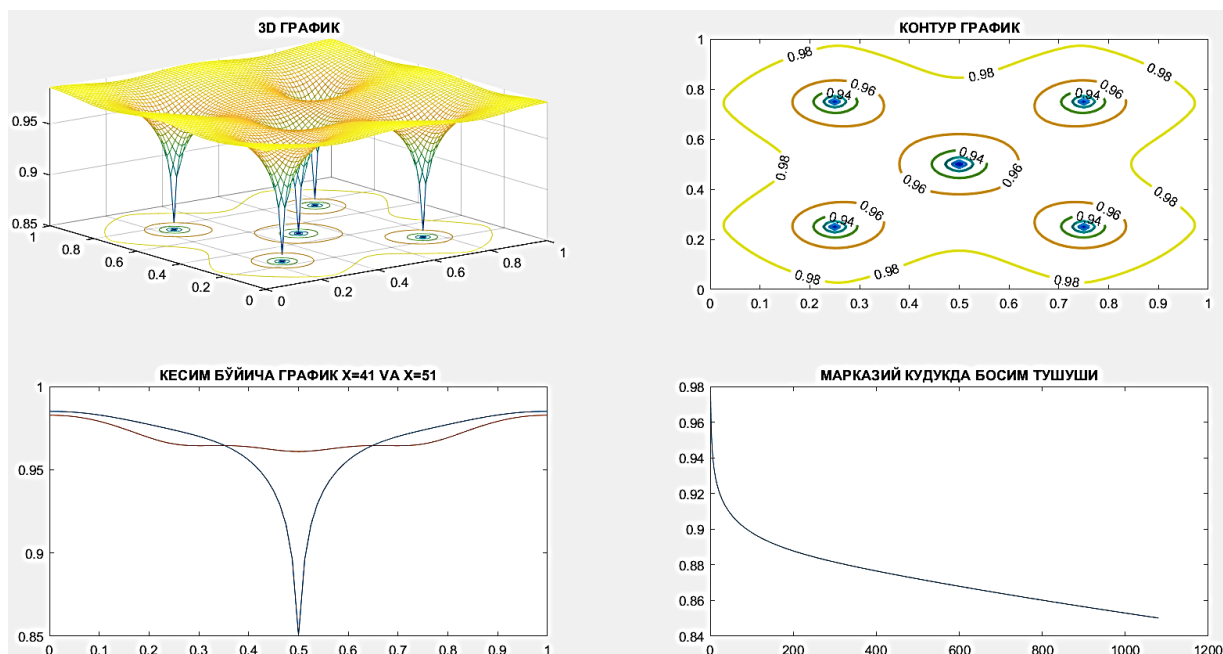


2.7-расм. Нуқталар сони $n_x=100$, $n_y=100$ бўлганда ҳисоблаш вақти натижалари

Ҳисоблаш тажрибасидан шуни айтишимиз мумкинки, нефть конини ўзлаштириш вақти ва координата чизиқлари нуқталари сони ортиши билан дастурнинг ишлаши самарадорлиги ошади.

Ушбу параллел ҳисоблаш алгоритми иккита ёки тўртта процессорли замонавий компьютерларда C++ дастурлаш тилининг OpenMP кутубхонаси орқали, Delfi, Matlab ва бошқа дастурлаш тилларининг параллел ҳисоблашга мўлжалланган махсус кутубхоналари орқали қўлланилса, компьютердаги ҳисоблаш жараёни сезиларли даражада камаяди ва ҳисоблаш вақти бўйича самарадорлик ошишини кўришимиз мумкин.

Шундай қилиб, ишлаб чиқилган параллел ҳисоблаш алгоритмлари параболик тенглама типига икки ўлчовли тенгламаларни ечишда кенг қўлланилиши мумкин. Масалан, улар ғовак муҳитида нефть ва газ қатламлари филтрацияси икки ва уч ўлчовли масалаларини ҳал қилиш учун фойдалидир.



2.8-расм. Нефть конини ўзлаштиришда қатламдаги босим ўзгариш графиклари

Ҳисоблаш жараёни 1080 суткада, нефть конини ўзлаштиришда филтрация жараёнининг қатламдаги босим ўзгариши куйидаги 2.8 -расмдаги графикларда келтирилган. Биринчи графикда 5 та қудуқ симметрик ҳолда жойлашган ҳолатда қатламда босим тарқалиши кузатилмоқда. Иккинчи графикда босим тарқалишининг контур графиги, учинчи графикда кесимда босим ўзгариши ва тўртинчи графикда марказий қудуқда босим тушиши берилган.

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСАЛАР

Говак муҳитда нефтьнинг икки ўлчовли филтрация чегаравий масаласи қурилган ва у ўзгарувчилар йўналиши схемасига асосланган чекли айирмали усул қўлланилиб сонли моделлаштирилган.

Қўйилган чегаравий масалани ечиш учун кўндаланг-кесим схемаси учун параллел ҳисоблаш ғоясининг тавсифига асосланиб, ҳар бир оралиқ вақтда учрашув-ҳайдаш усулидан фойдаланиш алгоритмик схемаси ишлаб чиқилган.

Ҳисоблашни параллел амалга ошириш мақсадида самарали ҳисоблаш алгоритмининг блок-схемаси ишлаб чиқилди.

Нефть конлари ишлашида филтрация жараёнининг асосий кўрсаткичларини ҳисоблашда кетадиган вақт, филтрация дискрет соҳаси x ва y ўқларидаги нуқталари сони ва ҳисоблаш вақти бўйича ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди ва улар таҳлил қилинди.

Ҳисоблаш тажрибалари шуни кўрсатадики координата нуқталари сони ошиши ва ҳисоблаш вақтининг ошиб боришида параллел ҳисоблаш алгоритмларидан фойдаланиш, асосий кўрсаткичларни ҳисоблаш жараёнини 40-50% га камайтиради.

Демак, таҳлиллар шуни кўрсатадики кўп ўлчовли филтрация масалаларини ечишда уларнинг яхши самара берувчи ҳисоблаш алгоритмларини яратиш ва параллел ҳисоблаш жараёнларини ташкил этиш учун юқори тезликда ишлашга эга замонавий кўп процессорли компьютерлардан фойдаланиш зарур. Бу эса қўйилган масалани ечиш жараёнини тезлаштиради ва нефть ёки газ конлари ишлаши асосий кўрсаткичларини тез ҳисоблаш имкониятини яратади. Натижада, филтрация жараёнини асосий кўрсаткичлар бўйича ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш орқали тез таҳлил ва башоратлаш имконини беради.

Шундай қилиб, ишлаб чиқилган ушбу параллел ҳисоблаш усуллари ва алгоритмлари параболик тенглама типигаги икки ўлчовли чегаравий масалаларни ечишда кенг қўлланилиши мумкин.

III БОБ. ҒОВАК МУҲИТДА УЧ ЎЛЧОВЛИ НЕФТЬ ФИЛЬТРАЦИЯ МАСАЛАСИНИ ЕЧИШДА ЧЕКЛИ АЙИРМАЛИ СОНЛИ МОДЕЛЛАР ВА САМАРАЛИ ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ АЛГОРИТМЛАР

Нефть конларини ўзлаштиришнинг асосий ва муҳим кўрсаткичлари бўлган қатлам босими ва қудуқлардаги босими ўзгариши, вақт ўтиши билан қудуқлар дебети ва уларнинг сони ўзгариши ва бошқа кўрсаткичларни ҳисоблашни нефть ёки газнинг беқарор филтрацион жараёнини ифодаловчи чегаравий шартга эга параболик типдаги дифференциал тенгламани сонли моделлаштириш ва уни ечиш ёрдамида аниқлаш мумкин.

Ғовакли муҳитда нефть филтрациясининг кўп ўлчовли масалалари муаммолари мураккаблиги сабабли, ҳозирги вақтда керакли аналитик ечимларни олиш мумкин эмас. Шунинг учун нефть ва газ конларини ўзлаштириш кўрсаткичлари бўйича компьютерда ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун турли хил сонли самарали усуллар, ҳисоблаш алгоритмлари ва уларнинг дастурий воситалари таклиф қилинади. Шу билан бирга, компьютерлардан фойдаланиш ва тегишли самарали сонли усуллардан фойдаланиш, ишончли сонли натижаларни олиш имконини беради.

Ушбу бобда ғовак муҳитда нефть филтрация жараёнининг уч ўлчовли математик модели, чегаравий масаланинг қўйилиши, уни сонли моделлаштириш масалалари қаралган. Сонли модел ўзгарувчилар йўналиши схемаси алгоритмик ғоясига асосланган бўлиб, унда ҳосил қилинган чекли айирмали тенгламалар тизими учрашув-ҳайдаш усулини қўллаган ҳолда ечилади. 2-бобда келтирилган параллел ҳисоблаш алгоритмик ғояси асосида уч ўлчовли масалани ечиш учун параллел ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилган. Ишлаб чиқилган параллел ҳисоблаш алгоритми учун дастурий таъминот яратилган ва у ёрдамида нефть филтрациясининг уч ўлчовли муҳитда асосий кўрсаткичлари ҳисобланган ҳамда ишлаб чиқилган алгоритмнинг ҳисоблаш самарадорлиги бўйича тажрибалар ўтказилган.

3.1. Ғовак муҳитда нефть филтрацияси масаласининг уч ўлчовли математик модели

Қатлам коллекторлик хоссалари ва унинг маҳсулдор зоналарини реал интерваллар бўйича ошишида қатламнинг ҳажми бўйича биржинслимаслигини ҳисобга олиш зарурати, филтрация назариясининг уч ўлчовли муаммоларини шакллантиришга олиб келади. Бунда қўйилган масала ечимини аналитик кўринишда оддий ҳол учун ҳам олиб бўлмайди ва буни сонли усулда ечиш тавсия этилади. Бунда сонли ечим дискрет соҳанинг фазовий ва вақт нукталари тўпламида аниқланади.

Нефть конлари конфигурациясининг мураккаблиги ва майдони бўйича қатлам параметрларининг ўзгарувчанлиги, қудуқларнинг нефтьли ҳудудда нотекис жойлашиши ва улар иш жараёнининг ўзгариб туриши каби чегараловчи омилларига боғлиқ ва улар қўйилган чегаравий масалани ечишда компьютер ҳисоб-китоблари учун жиддий қийинчиликлар туғдиради.

Юқоридаги омилларни ҳисобга олган ҳолда, нефтьнинг ғовак муҳитдаги ностационар филтрация жараёнининг уч ўлчовли математик модели қуйидаги параболик типдаги дифференциал тенглама билан тавсифланиши мумкин:

$$\beta h(x, y) \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k h}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k h}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k h}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) - Q, \quad (x, y, z) \in G \quad (3.1)$$

Нефть конларини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини аниқлашда (3.1) дифференциал тенгламани қуйидаги бошланғич ва чегаравий шартларда ечамиз:

$$P(x, y, z, t) = P_H(x, y, z), \quad t = 0, \quad (3.2)$$

$$-\frac{k h}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_A - P), \quad (x, y, z) \in \Gamma \quad (3.3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n_q} q_i \delta(x - x_i, y - y_i, z - z_i) \quad (3.4)$$

Бу ерда

P - қатламдаги босим;

P_H - қатламнинг дастлабки босими;

P_A - чегара босими;

μ - нефтьнинг динамик қовушқоқлиги;

k - ўтказувчанлик коэффициентлари;

h - қатлам қуввати;

β - қатлам эластик коэффициентлари $\beta = \beta_N m + \beta_M$;

β_N - нефтьнинг сиқилиш коэффициентлари;

β_M - муҳитнинг сиқилиш коэффициентлари;

q_{i_q} - i_q - кудук дебити;

S_{i_q} - i_q -кудук контури;

n - Γ соҳанинг чегарасига ички нормал;

n_q - кудуклар сони;

m - ғоваклик коэффициентлари;

δ - Дирак функцияси;

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{yopiq chegara,} \\ 1, & \text{oshiq chegara.} \end{cases}$$

(3.1)-(3.4) чегаравий масалани сонли чекли айирма усулида ечиш учун куйидаги ўлчовсиз ўзгарувчиларни киритамиз:

$$P^* = P / P_0; \quad x^* = x / L; \quad y^* = y / L; \quad z^* = z / h_0; \quad k^* = k / k_0; \quad h^* = h / h_0;$$

$$\tau = \frac{k_0 t}{\beta \mu L^2}; \quad q^* = \frac{q \mu}{\pi k_0 P_0 h_0}.$$

Бу ерда

P_0 -характерли босим қиймати;

k_0 - характерли ўтказувчанлик бошланғич қиймати;

h_0 - характерли қатлам қалинлигининг қиймати, $h_0 = \max(h(x, y))$;

1 -характерли қатлам узунлиги.

Кейинчалик, соддалик учун тенгламалардаги "*" белгиси тушуриб колдирилади. У ҳолда юқоридаги белгилашларни ҳисобга олган ҳолда, ўлчовсиз ўзгарувчилар учун масала қуйидагича қайта ёзилади:

$$h \frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k h \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k h \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k h \frac{\partial P}{\partial z} \right) - \sum_{i=1}^{n_q} q_i \delta(x - x_i, y - y_i, z - z_i) \quad (3.5)$$

$$P(x, y, z) = P_H(x, y, z), \quad t = 0, \quad (3.6)$$

$$-k h \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha (P_A - P), \quad (3.7)$$

Ушбу (3.5)-(3.7) нефть филтрация ўлчовсиз чегаравий масаласи, ўзгарувчилар йўналиши схемасига асосланган чекли айирмалар усули ёрдамида ечилади.

3.2. Ғовак муҳитда уч ўлчовли нефть филтрация чегаравий масаласини сонли моделлаштириш

Сонли моделлаштириш. (3.5)-(3.7) чегаравий масалани сонли ечиш учун филтрация соҳасини Δx , Δy , Δz қадамларда бўлиб дискрет соҳага алмаштириш учун қуйидаги тўр соҳасини курамиз:

$$\Omega_{xyz\tau} = \left\{ x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_r = r\Delta z, \tau = l\Delta \tau; i, j = \overline{1, N}; r = \overline{1, N}; l = \overline{0, N}, \Delta \tau = \frac{1}{N_\tau} \right\}.$$

Чекли айирмали тегламалар тизимини куриш учун ўзгарувчилар йўналишлари схемасининг алгоритмик ғояси (кўндаланг-кесим схемаси) ишлатилади. 1 -чи вақт қатлаидан $l+1$ вақт қатламига ўтиш $0.3\Delta \tau$ қадам билан уч босқичда амалга оширилади. Натижада учта чекли айирмали тенгламалар тизими ҳосил бўлади. У ҳолда ички нуқталар учун $l+1/3$, $l+2/3$ ва $l+1$ -чи вақт қатламларида чекли айирмали тенгламалар тизими қуйидаги шаклни бўлади:

$$\begin{aligned}
h_{i,j,r} \frac{P_{i,j,r}^{l+1/3} - P_{i,j,r}^l}{\Delta \tau / 3} &= \frac{T_{i-0.5,j,r} P_{i-1,j,r}^{l+1/3} - (T_{i-0.5,j,r} + T_{i+0.5,j,r}) P_{i,j,r}^{l+1/3} + T_{i+0.5,j,r} P_{i+1,j,r}^{l+1/3}}{\Delta x^2} + \\
&+ \frac{T_{i,j-0.5,r} P_{i,j-1,r}^l - (T_{i,j-0.5,r} + T_{i,j+0.5,r}) P_{i,j,r}^l + T_{i,j+0.5,r} P_{i,j+1,r}^l}{\Delta y^2} + \\
&+ \frac{L^2 T_{i,j,r-0.5} P_{i,j,r-1}^l - (T_{i,j,r-0.5} + T_{i,j,r+0.5}) P_{i,j,r}^l + T_{i,j,r+0.5} P_{i,j,r+1}^l}{h_0^2 \Delta z^2} - \delta_{i,j,r} q_{i,j,r},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_{i,j,r} \frac{P_{i,j,r}^{l+2/3} - P_{i,j,r}^{l+1/3}}{\Delta \tau / 3} &= \frac{T_{i-0.5,j,r} P_{i-1,j,r}^{l+1/3} - (T_{i-0.5,j,r} + T_{i+0.5,j,r}) P_{i,j,r}^{l+1/3} + T_{i+0.5,j,r} P_{i+1,j,r}^{l+1/3}}{\Delta x^2} + \\
&+ \frac{T_{i,j-0.5,r} P_{i,j-1,r}^{l+2/3} - (T_{i,j-0.5,r} + T_{i,j+0.5,r}) P_{i,j,r}^{l+2/3} + T_{i,j+0.5,r} P_{i,j+1,r}^{l+2/3}}{\Delta y^2} + \\
&+ \frac{L^2 T_{i,j,r-0.5} P_{i,j,r-1}^{l+1/3} - (T_{i,j,r-0.5} + T_{i,j,r+0.5}) P_{i,j,r}^{l+1/3} + T_{i,j,r+0.5} P_{i,j,r+1}^{l+1/3}}{h_0^2 \Delta z^2} - \delta_{i,j,r} q_{i,j,r},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
h_{i,j,r} \frac{P_{i,j,r}^{l+1} - P_{i,j,r}^{l+2/3}}{\Delta \tau / 3} &= \frac{T_{i-0.5,j,r} P_{i-1,j,r}^{l+2/3} - (T_{i-0.5,j,r} + T_{i+0.5,j,r}) P_{i,j,r}^{l+2/3} + T_{i+0.5,j,r} P_{i+1,j,r}^{l+2/3}}{\Delta x^2} + \\
&+ \frac{T_{i,j-0.5,r} P_{i,j-1,r}^{l+2/3} - (T_{i,j-0.5,r} + T_{i,j+0.5,r}) P_{i,j,r}^{l+2/3} + T_{i,j+0.5,r} P_{i,j+1,r}^{l+2/3}}{\Delta y^2} + \\
&+ \frac{L^2 T_{i,j,r-0.5} P_{i,j,r-1}^{l+1} - (T_{i,j,r-0.5} + T_{i,j,r+0.5}) P_{i,j,r}^{l+1} + T_{i,j,r+0.5} P_{i,j,r+1}^{l+1}}{h_0^2 \Delta z^2} - \delta_{i,j,r} q_{i,j,r},
\end{aligned}$$

Бу ерда

$$T_{i,j,r} = k_{i,j,r} h_{i,j,r};$$

$$T_{i-0.5,j,r} = \frac{T_{i-1,j,r} + T_{i,j,r}}{2}; \quad T_{i+0.5,j,r} = \frac{T_{i,j,r} + T_{i+1,j,r}}{2}; \quad T_{i,j-0.5,r} = \frac{T_{i,j-1,r} + T_{i,j,r}}{2};$$

$$T_{i,j+0.5,r} = \frac{T_{i,j,r} + T_{i,j+1,r}}{2}, \quad T_{i,j,r-0.5} = \frac{T_{i,j,r-1} + T_{i,j,r}}{2}; \quad T_{i,j,r+0.5} = \frac{T_{i,j,r} + T_{i,j,r+1}}{2}.$$

$l+1/3$ -вақт қатламида юқори аниқликда $P_{i,j,r}^{l+1/3}$ босим функцияси қийматини ҳисоблаш учун x ўқининг $x = x_i$ ҳар бир йўналишида қуйидаги уч нуқтали тенгламалар тизимини ечишимиз керак бўлади:

$$\begin{cases} (3 - 2\Delta x L\alpha) P_{0,j,r}^{l+1/3} - 4P_{1,j,r}^{l+1/3} + P_{2,j,r}^{l+1/3} = -2\Delta x L\alpha P_A, \\ a_i P_{i-10,j,r}^{l+1/3} - b_i P_{i,j,r}^{l+1/3} + c_i P_{i+1,j,r}^{l+1/3} = -d_i, \quad i, j = 1, 2, \dots, N-1; r = 1, 2, \dots, N1, \\ (3 - 2\Delta x L\alpha) P_{N,j,r}^{l+1/3} - 4P_{N-1,j,r}^{l+1/3} + P_{N-2,j,r}^{l+1/3} = 2\Delta x L\alpha P_A. \end{cases} \quad (3.8)$$

Бунда $a_i = T_{i-0.5,j,r}, \quad b_i = T_{i-0.5,j,r} + T_{i+0.5,j,r} + h_{i,j,r} \frac{\Delta x^2}{\Delta \tau / 3}, \quad c_i = T_{i+0.5,j,r},$

$$\begin{aligned} d_i = & \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \left[T_{i,j-0.5,r} P_{i,j-1,r}^l - (T_{i,j-0.5,r} + T_{i,j+0.5,r}) P_{i,j,r}^l + T_{i,j+0.5,r} P_{i,j+1,r}^l \right] + \\ & + \frac{L^2 \Delta x^2}{h_0^2 \Delta z^2} \left[T_{i,j,r-0.5} P_{i,j,r-1}^l - (T_{i,j,r-0.5} + T_{i,j,r+0.5}) P_{i,j,r}^l + T_{i,j,r+0.5} P_{i,j,r+1}^l \right] + \\ & + h_{i,j,r} \frac{\Delta x^2}{\Delta \tau / 3} P_{i,j,r}^l - \Delta x^2 \delta_{i,j,r} q_{i,j,r}. \end{aligned}$$

(3.8) тенгламалар тизимининг иккинчи тенгламаси филтрация соҳасининг ички нуқталарида, қолган биринчи ва учинчи тенгламалари четки нуқталарида ўринлидир. Бу чекли айирмали тенгламалар тизими ўзгарувчилар йўналиши бўйича ҳайдаш усулини қўллаш орқали ечилади.

$l+2/3$ -чи вақт қатлами учун ҳам худди шундай чекли айирмали тенгламалар тизимини ёзиш мумкин:

$$\begin{cases} (3 - 2\Delta y L\alpha) P_{i,0,r}^{l+2/3} - 4P_{i,1,r}^{l+2/3} + P_{i,2,r}^{l+2/3} = -2\Delta y L\alpha P_A, \\ a_j P_{i,j-1,r}^{l+2/3} - b_j P_{i,j,r}^{l+2/3} + c_j P_{i,j+1,r}^{l+2/3} = -d_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, N-1; r = 1, 2, \dots, N1, \\ (3 - 2\Delta y L\alpha) P_{i,N,r}^{l+2/3} - 4P_{i,N-1,r}^{l+2/3} + P_{i,N-2,r}^{l+2/3} = 2\Delta y L\alpha P_A. \end{cases} \quad (5.9)$$

Бунда $a_j = T_{i,j-0.5,r}, \quad b_j = T_{i,j-0.5,r} + T_{i,j+0.5,r} + h_{i,j,r} \frac{\Delta y^2}{\Delta \tau / 3}, \quad c_j = T_{i,j+0.5,r},$

$$\begin{aligned} d_j = & \frac{\Delta y^2}{\Delta x^2} \left[T_{i-0.5,j,r} P_{i-1,j,r}^{l+1/3} - (T_{i-0.5,j,r} + T_{i+0.5,j,r}) P_{i,j,r}^{l+1/3} + T_{i+0.5,j,r} P_{i+1,j,r}^{l+1/3} \right] + \\ & + \frac{L^2 \Delta y^2}{h_0^2 \Delta z^2} \left[T_{i,j,r-0.5} P_{i,j,r-1}^{l+1/3} - (T_{i,j,r-0.5} + T_{i,j,r+0.5}) P_{i,j,r}^{l+1/3} + T_{i,j,r+0.5} P_{i,j,r+1}^{l+1/3} \right] + \\ & + h_{i,j,r} \frac{\Delta y^2}{\Delta \tau / 3} P_{i,j,r}^{l+1/3} - \Delta y^2 \delta_{i,j,r} q_{i,j,r}. \end{aligned}$$

Худди шундай қилиб $l+1$ -вақт қатлами учун учинчи чекли айирмали тенгламалар тизимини ёзамиз:

$$\begin{cases} (3 - 2\Delta z L\alpha) P_{i,j,0}^{l+1} - 4P_{i,j,1}^{l+1} + P_{i,j,2}^{l+1} = -2\Delta z L\alpha P_A, \\ a_r P_{i,j,r-1}^{l+2/3} - b_j P_{i,j,r}^{l+1} + c_r P_{i,j,r+1}^{l+1} = -d_r, \quad i, j = 1, 2, \dots, N-1; r = 1, 2, \dots, N-1, \\ (3 - 2\Delta z L\alpha) P_{i,j,N}^{l+1} - 4P_{i,j,N-1}^{l+1} + P_{i,j,N-2}^{l+1} = 2\Delta z L\alpha P_A. \end{cases} \quad (5.10)$$

Бунда

$$\begin{aligned} a_r &= \frac{L^2}{h_0^2} T_{i,j,r-0.5}, \quad b_r = \frac{L^2}{h_0^2} T_{i,j,r-0.5} + \frac{L^2}{h_0^2} T_{i,j,r+0.5} + h_{i,j,r} \frac{\Delta z^2}{\Delta \tau / 3}, \quad c_r = \frac{L^2}{h_0^2} T_{i,j,r+0.5}, \\ d_r &= \frac{\Delta z^2}{\Delta x^2} \left[T_{i-0.5,j,r} P_{i-1,j,r}^{l+2/3} - (T_{i-0.5,j,r} + T_{i+0.5,j,r}) P_{i,j,r}^{l+2/3} + T_{i+0.5,j,r} P_{i+1,j,r}^{l+2/3} \right] + \\ &+ \frac{\Delta z^2}{\Delta y^2} \left[T_{i,j-0.5,r} P_{i,j-1,r}^{l+2/3} - (T_{i,j-0.5,r} + T_{i,j+0.5,r}) P_{i,j,r}^{l+2/3} + T_{i,j+0.5,r} P_{i,j,r+1}^{l+2/3} \right] + \\ &+ h_{i,j,r} \frac{\Delta z^2}{\Delta \tau / 3} P_{i,j,r}^{l+1/3} - \Delta z^2 \delta_{i,j,r} q_{i,j,r}. \end{aligned}$$

(3.8), (3.9) ва (3.10) тенгламалар тизими учун характерли томони шундаки, улар уч диагоналли матрицага эга (тўр майдонининг ҳар бир сатри ёки устунида). Бу ҳолат ечим топишда оралиқ $l+1/3$, $l+2/3$ ва $l+1$ -вақт босқичларида ҳайдаш усулидан фойдаланишга имкон беради.

Шундай қилиб, (3.8), (3.9) ва (3.10) чекли-айирмали тенгламалар тизимларига кўндаланг-кесим схемасини қўллаган ҳолда ҳайдаш усули билан ечилади. Бундай ҳолда, биринчи навбатда, Ox ўқи бўйлаб тўр майдонининг ҳар бир чизигида ҳайдаш усули амалга оширилади ва $l+1/3$ -вақт қатламида масаланинг оралиқ ечими олинади. Шундан сўнг, Oy ўқи бўйлаб чекли-айирмали тенгламалар тизими (3.9) ҳам худди шу тарзда ечилади. Бу олинган ечим $l+1$ -чи вақт қатламида керак бўлади. Бу схеманинг яқинлашиш аниқлиги $O[\Delta \tau + (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2]$ ни ташкил қилади.

3.3. Говак мухитда нефть филтрация чегаравий масаласини сонли ечишнинг параллел ҳисоблаш алгоритми

Ихтиёрий филтрация соҳаси учун нефть конларини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини аниқлашнинг ҳисоблаш алгоритмини кўриб чиқайлик. Бунда белгиланган вақт қатлами учун масалани ечиш алгоритмини сонли усулда амалга ошириш қуйида келтирилган босқичлардан иборат бўлади.

Нефть конини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш алгоритмининг биринчи босқичи x ўзгарувчиси йўналиши бўйича $l+1/3$ вақт қатламидаги босим функцияси қийматларини ҳисоблаш йўли билан амалга оширилади. Бунда x ўзгарувчиси йўналиши бўйича ҳайдаш усули қўлланилади ва ҳисоблаш қуйидагича амалга оширилади:

- α_0 ва β_0 ҳайдаш усули коэффициентларининг бошланғич қийматлари дискрет филтрация майдони чап қисмининг чегара шартларидан аниқланади, яъни уч нуқтали тенгламалар тизимининг биринчи тенгламасидан (5.8);

- уч нуқтали (5.8) чекли-айирма тенгламасидаги иккинчи тенгламадан a_i, b_i, c_i, d_i ($i = 1, 2, \dots, N-1$) коэффициентлари ҳисобланади;

- α_i ва β_i ҳайдаш коэффициентларининг қийматлари ҳисобланади ($i = 1, 2, \dots, N-1$);

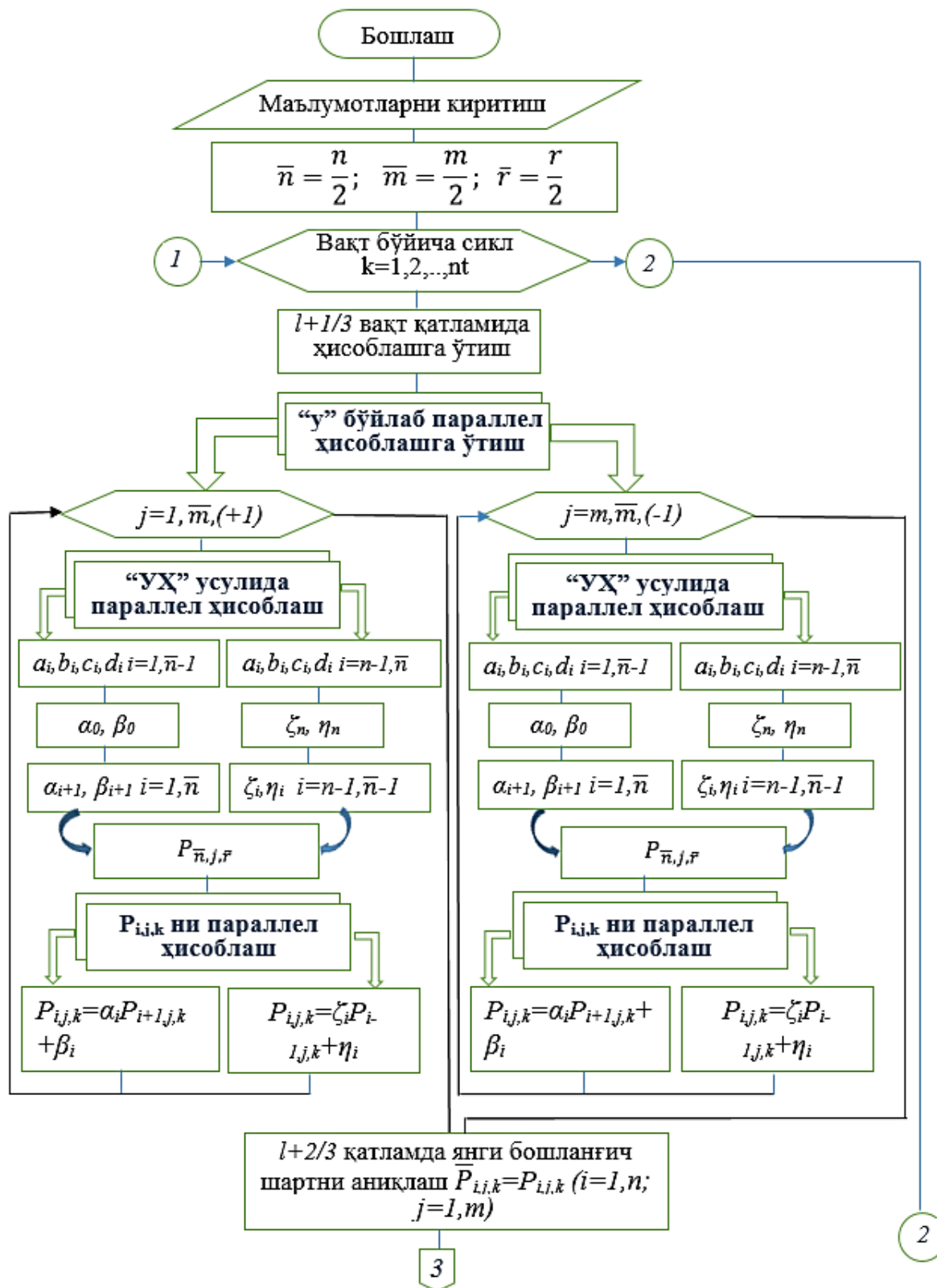
- $P_{N,j,r}$ босим функциясининг охириги қийматлари (5.8) тенгламалар тизимининг учинчи тенгламасидан аниқланади;

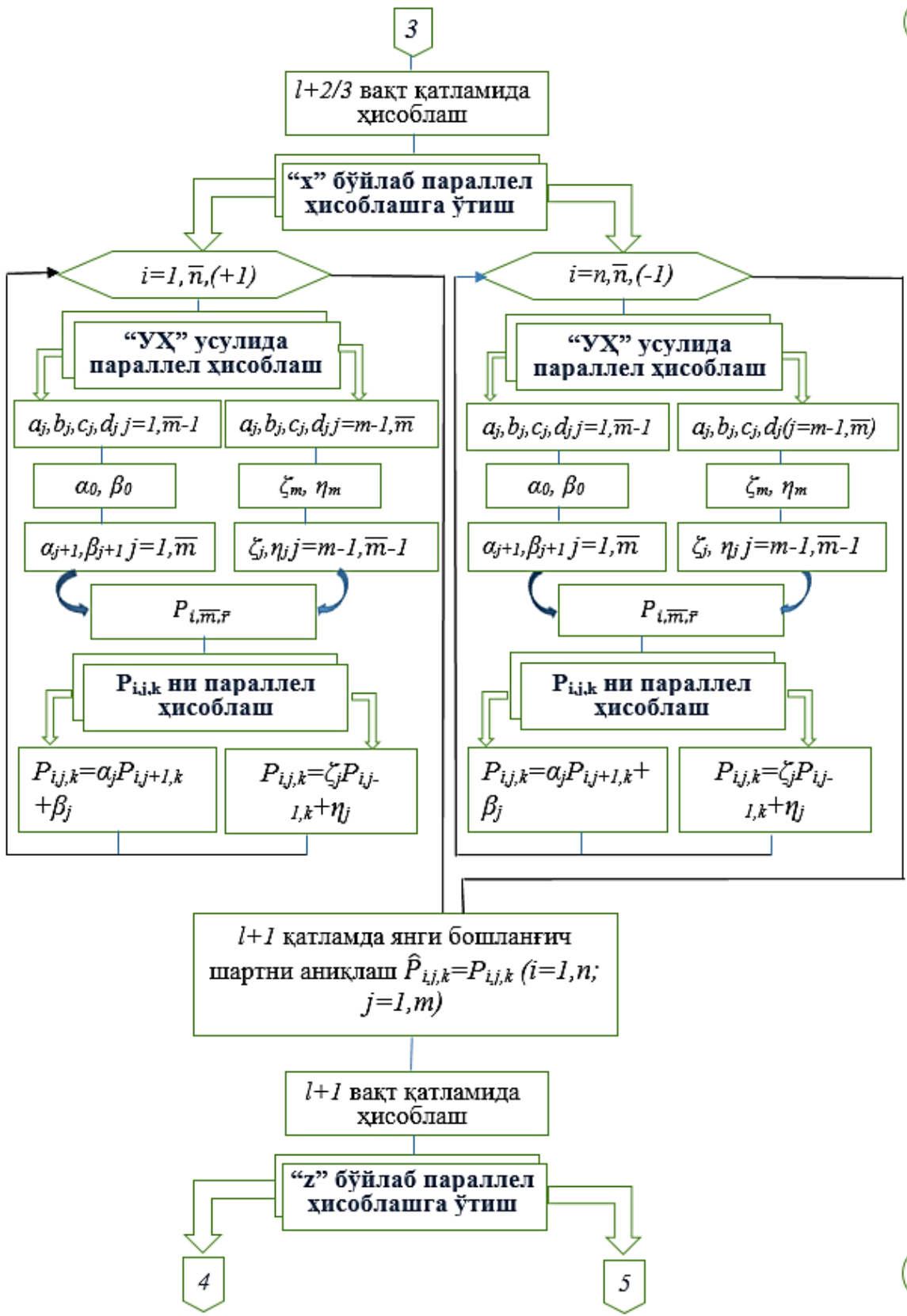
- $P_{i,j,r}$ ($i = N-1, N-2, \dots, 1$) босим функциясининг қийматлари тескари ҳайдаш орқали ҳисобланади.

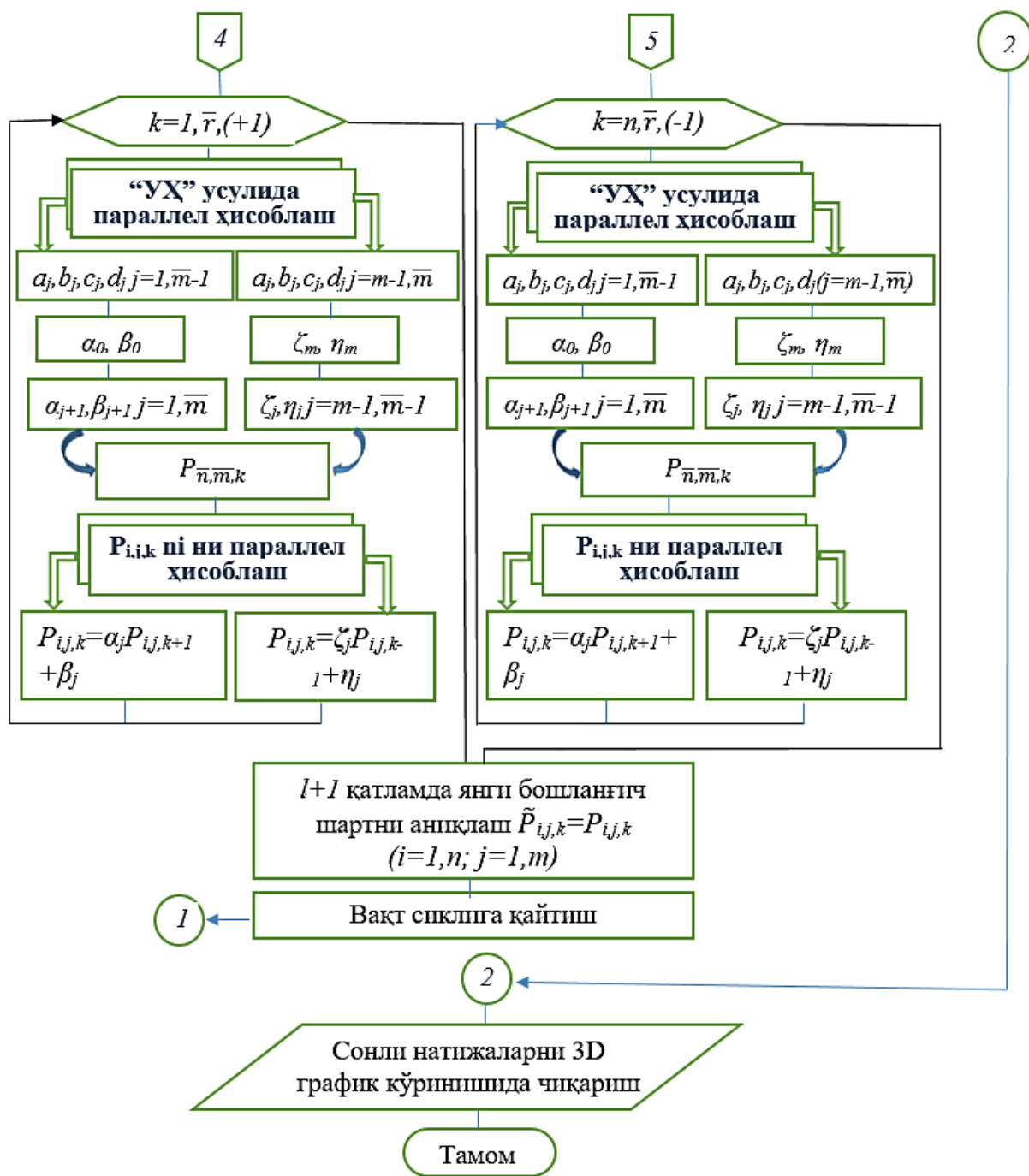
Алгоритмнинг иккинчи ва учинчи босқичлари шунга ўхшаш тарзда мос равишда $l+2/3$ ва $l+1$ -вақт қатламида y ва z ўзгарувчиси йўналиши бўйича аниқланади.

Биринчи, иккинчи ва учинчи босқичларнинг алгоритмлари ҳар бир вақт қатламида такрорланади. Бундай ҳолда, олинган ҳар бир ечим кейинги вақт

босқичи учун бошланғич шарт бўлиб хизмат қилади. Сонли ечим алгоритмининг блок схемаси қуйидаги расмда кўрсатилган. 3.1 расмда 2-бобда келтирилган параллел ҳисоблаш алгоритмик схемаси ғоясига асосланган параллел ҳисоблаш алгоритми келтирилган.







3.2-расм. Уч ўлчамли масalani ечишда кўндаланг-кесим схемаси учун самарали параллел ҳисоблаш алгоритми блок-схемаси

3.4. Нефть филтрация жараёнининг асосий кўрсаткичларини тадқиқ қилишда параллел ҳисоблаш алгоритмларининг самарадорлигини баҳолаш

Ҳисоблаш тажрибалари. Юқорида тавсифланган уч о'лчовли сонли модел ва алгоритм асосида нефть конларини о'злаштиришнинг асосий кўрсаткичларини Matlab дастурий воситаси ёрдамида ҳисоблаш учун дастурий таъминот ишлаб чиқилди. Дастурий таъминот дастлабки маълумотларни киритиш, кўрсаткичларни ҳисоблаш ва ҳисоблаш натижаларини чиқариш блокидан иборат. Ҳисоблаш тажрибаси натижалари 3D график шаклида визуал формада тақдим этилади.

Биламизки дастурий таъминот ёрдамида нефть конларини ўзлаштиришнинг филтрация жараёнлари асосий кўрсаткичларини ҳисоблашга кетадиган вақт, асосан филтрация дискрет соҳасининг ўлчамига, яъни ундаги x ва y ўқларининг нуқталари сонига ва ҳисоблаш вақтига боғлиқдир. Агар дискрет соҳада ҳар бир йўналиш бўйича нуқталар сони кўп бўлса ва ҳисоблаш вақти, яъни нефть кони ишлашининг бир неча йиллик кўрсаткичларини ҳисоблаш зарур бўлса, u ҳолда дастур тўлиқ ишлаши учун жуда катта вақтни талаб этади. Бунда ҳисоблаш жараёнини камайтириш асосан параллел ҳисоблаш алгоритмларини ва уларга мос дастурий модуларни яратиш ҳамда ундан самарали фойдаланиш орқали амалга оширилади.

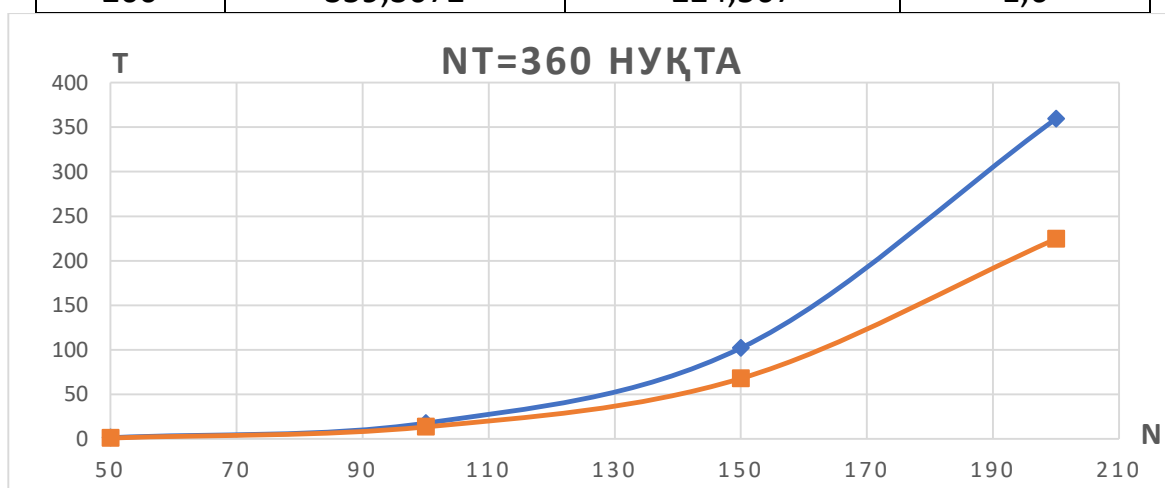
Шунинг учун ҳисоблаш тажрибалари координата чизиқларининг нуқталари сони ва умумий ҳисоблаш вақти бўйича ўтказилган. Биринчи ҳисоблаш тажрибалари координата ўқларидаги нуқталар сони (50,50), (100,100), (150,150) ва (200,200) бўлганда ва ҳисоблаш вақти 360 ва 720 сутка бўлганда амалга оширилган (3.1, 3.2 -жадваллар ва 3.3, 3.4-расмлар). Иккинчи ҳисоблаш тажрибаси эса координата ўқларидаги нуқталар сони (50,50) ва (100,100) бўлганда 360 ва 720 сутка вақт учун амалга оширилган (3.3, 3.4 – жадвал ва 3.5, 3.6-расмлар). Барча ҳисоблашларда z ўқи бўйиша нуқталар сони 30 та қилиб олинган.

Барча график ва жадваллардаги натижалардан шуни айтиш мумкинки, параллел ҳисоблаш алгоритми дискрет филтрация соҳаси ўлчамлари ошиши билан кетме-кет ҳисоблаш алгоритмига қараганда анча самарадорлиги ошиб боради. Худди шундай ҳисоблаш вақтининг ошишида ҳам самарадорликнинг ошиши кузатилади. Самарадорлик иккала ҳисоблаш тажрибаларида ҳам 1.5 баравардан ошиқ эканлигини кўрсатмоқда. Бу ўз навбатида ишлаб чиқилган параллел ҳисоблаш алгоритми асосида тузилган параллел ишловчи дастурий таъминот асосий кўрсаткичларни ҳисоблашни бир неча баробар тезлашишини таъминлайди. Шуни таъкидлаш лозимки, дискрет филтрация соҳаси нуқталари сони ошиши ва коннинг ўзлаштириш вақтини оширишда ҳисоблаш жараёнида катта ютуққа эришилади.

Жадвал 3.1

Самарадорликни нуқталар сонининг ошиши бўйича ҳисоблаш

Вақт(360 сутка)			
Нуқталар сони	Кетма-кет ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Параллел ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Ҳисоблаш самарадорлиги
50	1,4304	1,192	1,2
100	17,8152	13,704	1,3
150	102,0465	68,031	1,5
200	359,3072	224,567	1,6

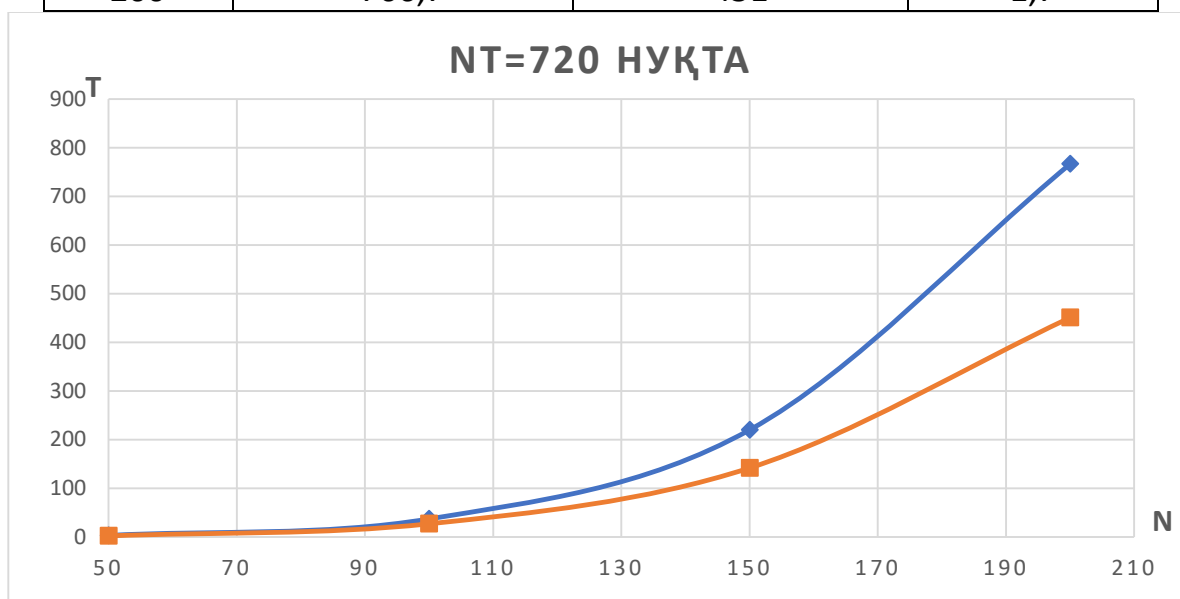


3.3-расм. Нуқталар сонининг ошиши бўйича самарадорлик графиги

Жадвал 3.2

Самарадорликни нуқталар сонининг ошиши бўйича ҳисоблаш

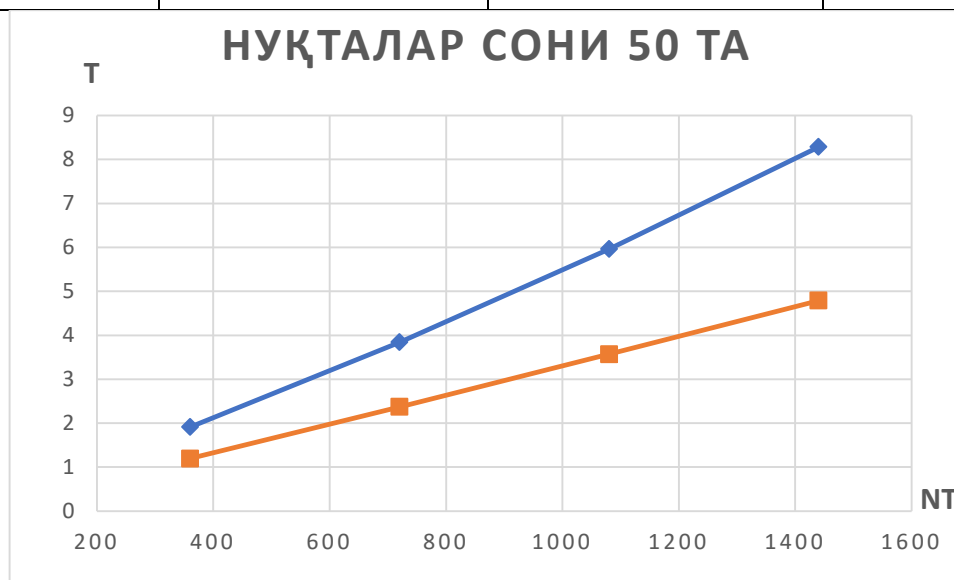
Вақт(720 сутка)			
Нуқталар сони	Кетма-кет ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Параллел ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Ҳисоблаш самарадорлиги
50	3,0784	2,368	1,3
100	37,0056	27,21	1,4
150	220,1	142	1,6
200	766,7	451	1,7



3.4-расм. Нуқталар сонининг ошиши бўйича самарадорлик графиги

Самарадорликни вақт сонининг ошиши бўйича ҳисоблаш

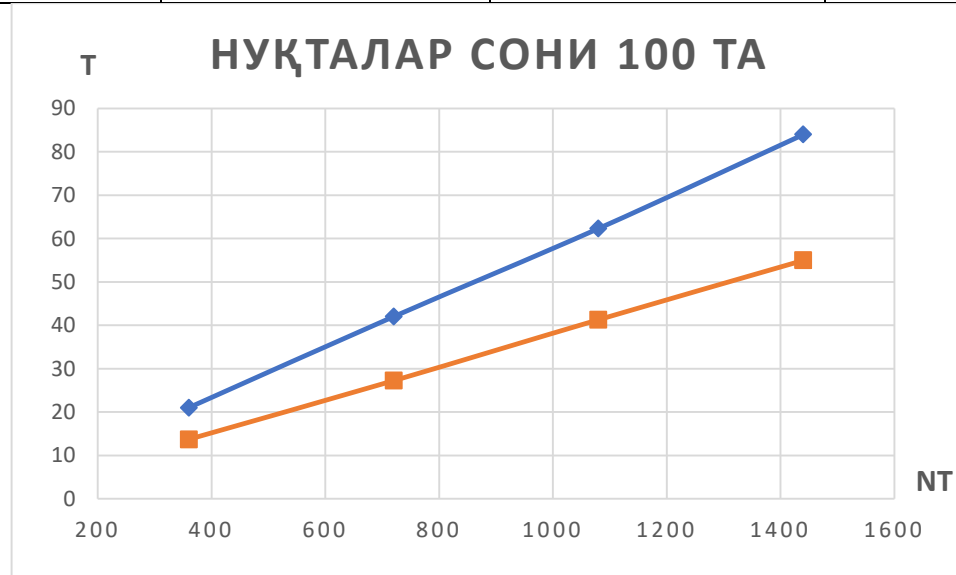
n=50 та нуқта			
Нуқталар сони	Кетма-кет ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Параллел ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Ҳисоблаш самарадорлиги
360	1,9136	1,196	1,60
720	3,84102	2,371	1,62
1080	5,96023	3,569	1,67
1440	8,28324	4,788	1,73



3.5-расм. Вақт сонининг ошиши бўйича самарадорлик графиги

Самарадорликни вақт сонининг ошиши бўйича ҳисоблаш

n=100 та нуқта			
Нуқталар сони	Кетма-кет ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Параллел ҳисоблаш вақти(миллисекунд)	Ҳисоблаш самарадорлиги
360	21	13,687	1,62
720	42	27,23	1,65
1080	62,33	41,3	1,69
1440	84	55	1,78



3.6-расм. Вақт сонининг ошиши бўйича самарадорлик графиги

Юқоридаги ҳисоблаш тажрибалари нефть конларини ўзлаштиришда коллекторларнинг турли параметрлари ва қудуқлар дебитлари бўйича ўтказилди. Тасаввур қилиш учун биз бир қатор дастлабки маълумотларга оид масалаларнинг сонли ечимларини тақдим этамиз. Вазифанинг дастлабки маълумотлари қуйидагилардан иборат:

катлам узунлиги $L_x=10000$ м;

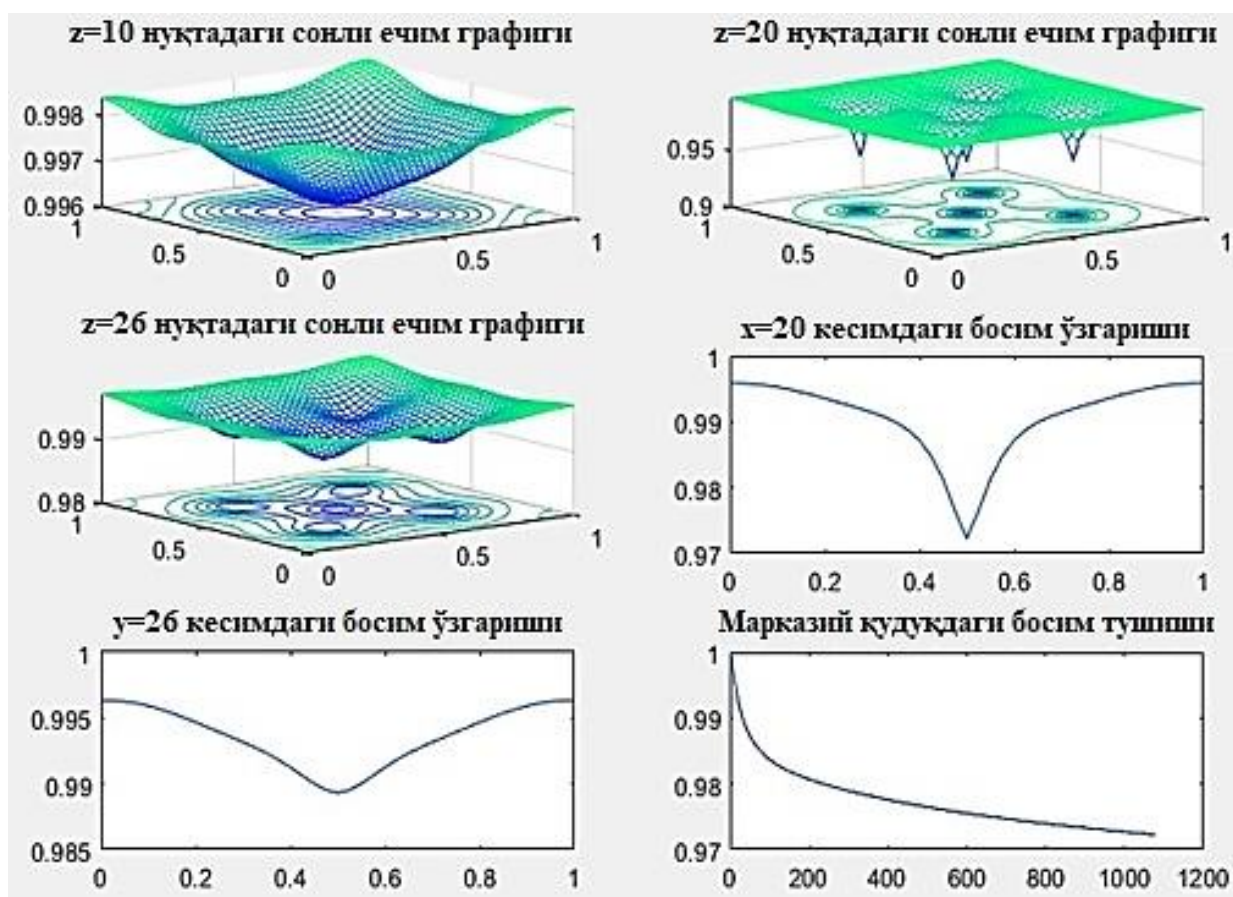
катламнинг дастлабки босими $P=300$ атм. ;

нефтьнинг қовушқоқлиги $\mu =3$ ва 5 сПз;

нефть қонида бир хил $q=10000$ м³/кун дебитли бешта қудуқ мавжуд.

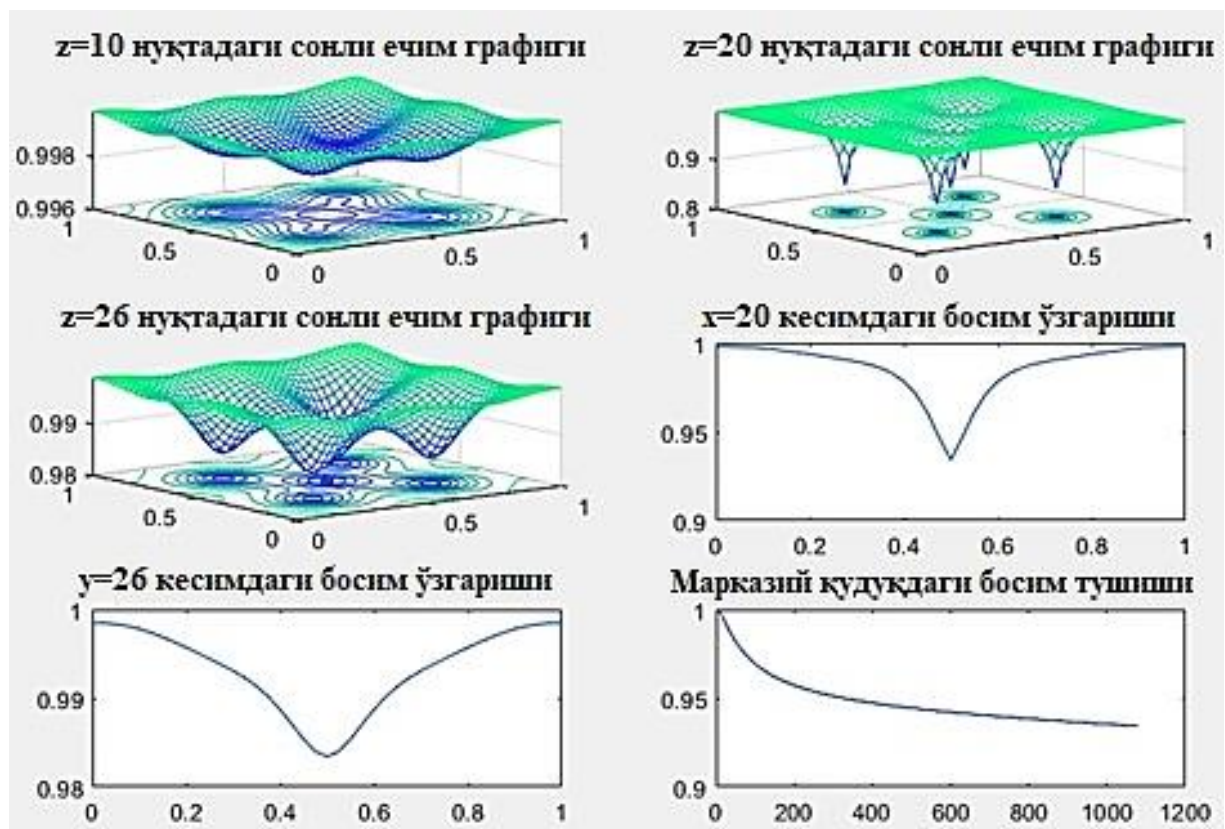
Ишланма бошланганидан бошлаб 1080 кун давомида нефть босимини тақсимлаш бўйича ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди. Ҳисоблаш тажрибалари натижалари 2-4-расмда коллектор ўтказувчанлиги ва нефть қовушқоқлигининг турли қийматлари учун графикларда кўрсатилган. Ушбу расмларда дастлабки учта графикда нефть босимининг қатламдаги $z=10$, $z=15$, $z=26$ кесимда ва турғун нуқтасининг $x=20$ ва $y=26$ кесимида тақсимланиши кўрсатилган. Охириги график вақт ўтиши билан марказий қудуқларда босимнинг пасайишини кўрсатади.

Кўришиб турибдики, ҳисоблаш тажрибаси натижалари коллектор ўтказувчанлиги камроқ ва нефтьнинг қовушқоқлиги юқори бўлганда, қатламда босимнинг тезроқ тақсимланишини кўрсатади.

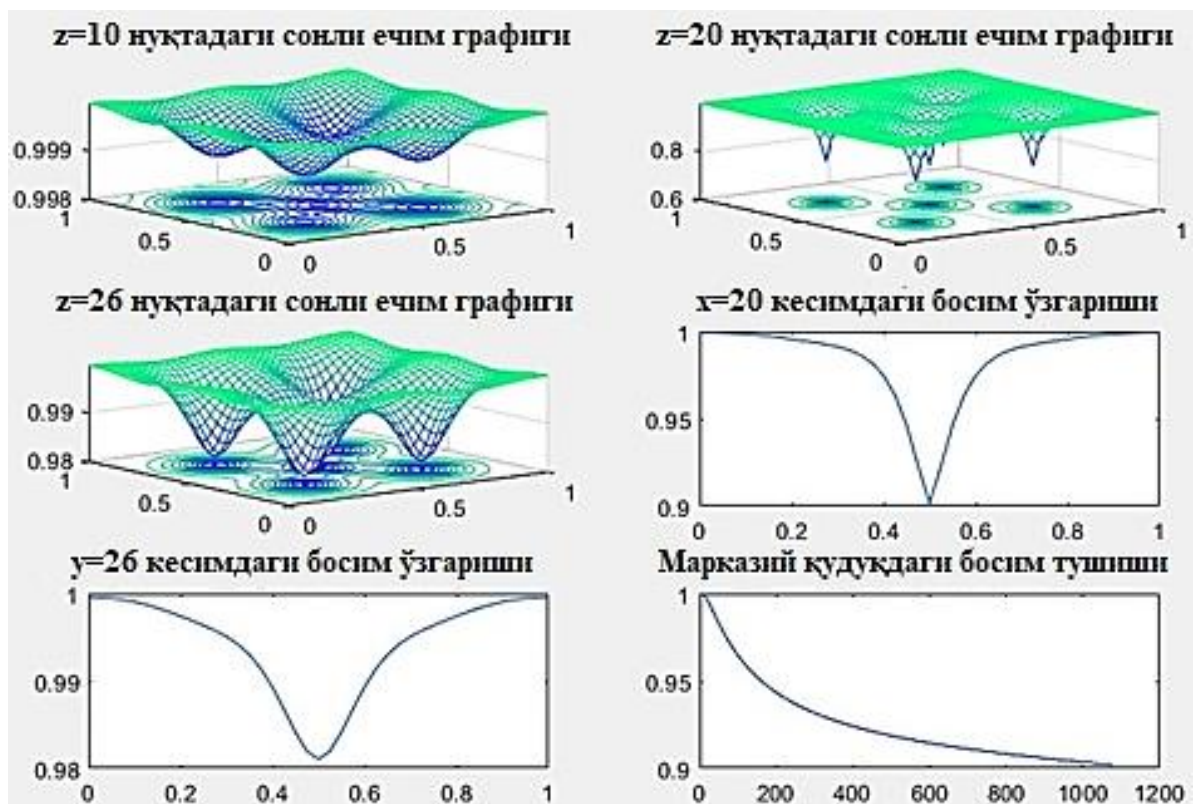


2-расм. Уч ўлчовли масалани сонли ечиш натижалари графиги

$$(k = 0.3 D.; \mu = 3cPз)$$



3-расм. Уч ўлчовли масalani сонли ечиш натижалари графиги
 ($k = 0.1 D.$; $\mu = 3cPz$)



4-расм. Уч ўлчовли масalani сонли ечиш натижалари графиги
 ($k = 0.1 D.$; $\mu = 5cPz$)

Компютерда моделлаштириш ва ҳисоблаш тажрибалари нефть конларини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини аниқлаш имконини берди. Шу билан бирга, нефтьнинг қовушқоқлиги ва қатлам ўтказувчанлигининг қатламдаги босим тақсимотига таъсири ўрганилди. Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, қатлам ўтказувчанлигининг катта қиймати билан босимнинг тақсимланиши тезроқ ва юқори нефтьнинг қовушқоқлиги билан секин тақсимланишини кўриш мумкин.

Шундай қилиб, ишлаб чиқилган усуллар ва нефть конларини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш учун яратилган дастурий таъминот, уч ўлчовли чегаравий масалаларни ҳал қилиш орқали нефть ва газ конларида филтрация жараёнларини таҳлил қилиш ва башорат қилишда, шунингдек сонли натижаларни уч ўлчовли графиклар кўринишида тақдим этишда фойдаланиш мумкин.

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСАЛАР

Нефть конлари қатламларидаги ностационар филтрацион жараённинг уч ўлчовли математик модели асосида чегаравий масала қурилди ва уни ечишнинг сонли модели ишлаб чиқилди.

Нефть конларини ўзлаштириш жараёнининг асосий кўрсаткичларини аниқлаш учун уч ўлчовли чегаравий масалани ечишнинг самарали ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди.

Нефть конлари ишлашида филтрация жараёнининг асосий кўрсаткичларини ҳисоблашда кетадиган вақт, филтрация дискрет соҳаси x ва y ўқларидаги нуқталари сони ва ҳисоблаш вақти бўйича ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди ва улар таҳлил қилинди.

Ҳисоблаш тажрибаларидан шуни айтиш жоизки, асосий кўрсаткичларни ҳисоблашда координата нуқталари сони ошиши ва ҳисоблаш вақтининг ошиб боришида параллел ҳисоблаш алгоритмларидан фойдаланиш самарадор эканлигини кўрсатилди.

VI БОБ. ҒОВАК МУҲИТДА ИККИ ЎЛЧОВЛИ НЕФТЬ ФИЛЬТРАЦИЯ МАСАЛАСИНИ ЕЧИШДА ДИФФЕРЕНЦИАЛ АЙИРМАЛИ СОНЛИ МОДЕЛЛАР ВА САМАРАЛИ ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ АЛГОРИТМЛАР

Маълумки бир жинсли бўлмаган ғовак муҳитда суюқлик ва газларнинг фильтрация чегаравий масалаларини ечиш анча мураккаблиги сабаб, жараёнини ўрганиш учун математик ва компьютер моделлаштириш усуллари қўлланилади. Бундай масалаларнинг аналитик ечимини куриш жуда мураккаб бўлиб, ҳатто кўп ҳолларда бир ўлчамли масала учун ҳам топиш анча қийинчилик туғдиради.

Ҳозирги кунда фан ва техниканинг ривожланиб бориши, ҳамда шу билан бирга компьютер технологияларининг барча соҳаларга кириб келиши ва ишлаб чиқаришнинг ўсиб бориши бундай масалаларни ечишда замонавий математик ва компьютер моделлаштириш усуллари ишлаб чиқиш ва улардан кенг фойдаланишни талаб этади. Айниқса нефт ва газ конлари ишлаши, ҳамда уларни қазиб олиш жараёнида бир жинсли бўлмаган қатламларда нефт ва газларнинг мураккаб филтрланиш жараёнини тадқиқ қилишда келиб чиқадиган масалаларни ечишни математик моделлаштиришсиз тасаввур қилиб бўлмайди. Бу борада шу кунгача кўплаб илмий тадқиқот ишлари қилинган. Бироқ, ҳозирги кунда нефт ва газларнинг ғовак муҳитда фильтрация масаласи учун кўплаб математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминотлар яратилган. Шунга қарамай, нефт ва газ конлари ғовак муҳитда бўладиган мураккаб жараёнларни тадқиқ қилиш ва башорат қилишнинг имконини берувчи натижаларни таҳлил қилиш, ҳамда визуал 3 ўлчамли график ва анимация формаларида тақдим этувчи компьютерли моделлар яратиш муаммолари етарли даражада ўрганиб чиқилмаган.

Жараёнларни компьютерли моделлаштириш, натижаларни график ва анимацион кўринишда визуаллаштирилган формада ташкил этишда

математик тизимлар ичида Matlab тизимининг имкониятлари анча юқори. Бунда натижаларни график тасвирини бир, икки ва уч ўлчамли кўринишларда тасвирлаш учун махсус функциялар тўплами мавжудки, улар ёрдамида дастур интерфейсини ташкил этиш ва натижаларни етарлича Компьютер экранида визуал формада икки ва уч ўлчамли графиклар кўринишида тақдим этиш мумкин.

Ушбу бобда бир жинсли бўлмаган ғовак муҳитда нефть фильтрация жараёнининг икки ўлчамли математик модели, маслани ечишнинг дифференциал-айирмали схема ғояси ва дифференциал прогонка усулига асосланган ҳолда уни сонли моделлаштириш ва ечишда параллел ҳисоблаш алгоритмини тузиш масаласи қаралган.

Ишлаб чиқилган дискрет моделда ички ва ташқи чегаравий шартларни ҳисобга олиш масаласи ҳам қараб ўтилган бўлиб, чегарада дифференциал прогонка коэффицентларини қандай аниқлаш масаласи ҳам ёритилган. Суюқликларнинг фильтрация жараёнида бир жинсли бўлмаган ғовак муҳитли қатламларида босим ўзгариши, босимнинг қатлам бўйлаб тарқалиши ва суюқликлар хоссаларини характерловчи параметрларнинг таъсири ўрганилиб чиқилган.

4.1.Бир жинсли бўлмаган ғовак муҳитли қатламда нефть ностационар фильтрация масаласи математик модели

Суюқликлар ёки газларнинг ғовак муҳитлардаги стационар бўлмаган филтрланиш жараёнининг математик модели бир муҳитли ва бир муҳитли бўлмаган хусусий ҳосилали дифференциал тенгламалар учун чегаравий масала кўринишида ифодаланади. Бундай чегаравий масалаларни аналитик кўринишда ечиш катта қийинчилик туғдиради, кўп ҳолларда оддий ҳол учун ҳам унинг аниқ ечимини топиш жуда мураккабдир.

Ўтказувчанлик коэффицент бўйича бир жинсли бўлмаган ғовак муҳитда суюқликнинг ностационар филтрланиш жараёнини қарайлик.

Қаралаётган ғовак муҳитда суёқликлар ҳаракатланаётган қатлам бир хил баландликда h , узунлиги L , ғоваклик коэффиценти m , турли қилдаги қийматларга эга бўлган ўтказувчанлик коэффиценти k ва қатламнинг бошланғич босими $P_H > 0$ бўлсин. Бир жинсли бўлмаган қатламдаги босимни ифодаловчи функциянинг вақт бўйича ўзгаришини аниқлаш керак бўлсин. Бунда жараёни ифодаловчи математик модел хусусий ҳосилали парабolik типдаги дифференциал тенглама бўлиб, унга мос чегаравий шартлар кўринишида бўлади. Математик модел қуйидаги фаразларга асосланади:

- 1) Ғовак муҳитдаги нефт ҳаракати тўғри чизикда бўлиб, у қаралаётган филтрланиш соҳасида “Дарси чизикли қоидаси”га бўйсинади.
- 2) Ғовак муҳитнинг ўтказувчанлик коэффиценти нефт қатламининг вертикал йўналиши бўйича ҳа хил.
- 3) Нефт физик хоссаси вақт бўйича ўзгармайди.

Бу фаразларга асосланган математик модел хусусий ҳосилали икки ўлчовли парабolik типдаги дифференциал тенглама кўринишида ифодаланади ва у қуйидагича ёзилади:

$$\beta h(x, y) \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - Q, \quad (4.1)$$

Нефть конлари асосий кўрсаткичларини аниқлашда (4.1) дифференциал тенламанинг ечиш учун қуйидаги бошланғич ва чегаравий шартларни қараймиз:

$$P(x, y) = P_H(x, y), \quad t = 0, \quad (4.2)$$

$$-\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_A - P), \quad (x, y) \in \Gamma, \quad (4.3)$$

$$\int_{s_{i_q}} \frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t) \quad (x, y) \in s_{i_q}, \quad i_q = \overline{1, N_q}. \quad (4.4)$$

$$Q = \sum_{i,j=1}^{N_q} \delta_{i,j} q_{i,j}$$

$$\beta = m\beta_H + \beta_c.$$

Бу ерда

n - чегарага ички нормал;

q_i - i -чи нефт қудуғининг дебити;

N_q - қудуқлар сони;

s_i - i -чи қудуқ контури;

c_1 - ўлчамга келтирилувчи коэффициент;

p - нефт соҳаси қатламининг босими;

k - қатламнинг ўтказувчанлик коэффициенти;

m - ғоваклик коэффициенти;

h - қатламнинг қуввати;

μ - нефтнинг қовушқоқлик коэффициенти;

β - нефт қатламининг упругоёмкость коэффициенти;

n_1 - s контурига бўлган нормал.

Чегаравий масаладаги математик моделнинг бизга аниқ бўлган мавжуд математик моделлардан фарқли томони шундаки, бу ерда ғоваклик коэффициенти m ва ўтказувчанлик коэффициенти k бўлакли бир жинсли қатлам учун тушунилади.

Қўйилган чегаравий масалани сонли моделлаштириш учун (4.1)-(4.4) дифференциал айирмали усулдан фойдаланамиз. Бунинг учун қўйилган чегаравий масалани математик модел ва чегаравий шартларда ўлчамсиз ўзгарувчилар киритиб ўлчамсиз масалага келтириш учун қуйидаги белгилашларни киритамиз:

$$P^* = P/P_0; \quad x^* = x/L; \quad y^* = y/L; \quad k^* = k/k_0; \quad h^* = h/h_0;$$

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

бу ерда P_0 – маълум характердаги қатлам босимининг қиймати;

k_0 - маълум характердаги қатлам ўтказувчанлигининг қиймати;

μ_0 - маълум характердаги ковушқоқлик қиймати;

L - маълум характердаги газ қатлами узунлиги.

Бу белгилашлардан фойдаланиб масалада юлдузча белгиларини ташлаб берилган масала учун қуйдаги ўлчамсиз масалага келамиз.

$$h \frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) - Q, \quad (4.5)$$

$$P(x, y) = P_H(x, y) \quad t = 0, \quad (x, y) \in G, \quad (4.6)$$

$$-k(x, y) h(x, y) \frac{\partial P}{\partial n} = \alpha (P_A - P) \quad (x, y) \in \Gamma, \quad (4.7)$$

$$\int_{s_{i_q}} \frac{k(x, y) h(x, y)}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} ds = -q_{i_q}(t) \quad (x, y) \in s_{i_q}, \quad i_q = \overline{1, N_q}. \quad (4.8)$$

4.2. Бир жинсли бўлмаган ғовакли қатламда сууюқликлар ностационар филтрация масаласини сонли моделлаштириш

Ўлчамсиз шаклга келтирилган (4.5)-(4.8) чегаравий масалани сонли моделлаштириш учун чегара Γ билан биргаликда G филтрация соҳасини бир хил қадамли $\Delta h = \Delta h_x = \Delta h_y$ тўр соҳасига алмаштираамиз:

$$\Omega_{xy\tau_k} = \left\{ (x_i = i\Delta h, y_j = j\Delta h, \tau_k = k \Delta \tau); i = \overline{1, N_j}; j = \overline{1, M_i}, k = \overline{0, N_\tau}, \Delta \tau = \frac{1}{N_\tau} \right\}.$$

Бу соҳада чекли айирмалли масаласини қуриш учун ошқормас ўзгарувчилар йўналиши схемасининг (кўндаланг-кесим схемаси) алгоритмик ғояси қўлланилади. l - вақт қатлаидан $l+1$ қатламга ўтиш $0.5\Delta\tau$ қадам билан икки босқичда амалга оширилади.

Ҳар бир қудуқ ўз даври билан тугун нуқтасига тушади деб тахмин қилинади. Чекли айирмалли муаммосини олиш учун ўзгарувчан йўналишлар учун яширин схеманинг алгоритмик ғояси қўлланилади (узунламасина-кўндаланг схема). Вақтинчалик қатламдан қатламга ўтиш икки босқичда босқичма-босқич амалга оширилади. Натижада иккита чекланган фарқ тенгламалари тизимининг кетма-кет эчими олинади.

Икки ўлчамли (2.5) – (2.8) нефт қатламидаги ғовак муҳитда филтрланиш жараёни чегаравий масаласини дифференциал - айирмалар кўринишига келтириш учун ўзгарувчилар йўналиши схемасининг алгоритмик ғоясини, биргаликда юқорида келтирилган дифференциал прогонка усули билан камбинация қилиб ишлатамиз. Бу эса дифференциал прогонка усулини ўзгарувчи y нинг ҳар бир йўналишида прогонка усулини қўллаб шу вақт оралиғида ечимни аниқлаймиз ва кейин шу алгоритм бўйича $\tau+1$ да иккинчи

Ўзгарувчи y бўйича биринчи ўзгарувчи x нинг ҳар бир йўналишида прогонка усулини қўллаб шу вақт оралиғида ечимни аниқлаймиз. Бу алгоритм кейинги вақт қадамларида ҳам шу йўсинда амалга оширилади.

Тенгламанинг дифференциал операторларини унга мос икки қатламли (слойли) уч нуқтали чекли айирмали операторга мос қилиб алмаштирамиз

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{1ij} \frac{\partial p_{1j}^{(k+0.5)}(x)}{\partial x} \right) - \frac{1}{0.5\tau} p_{1j}^{(k+0.5)}(x) = -\frac{p_{1j}^{(k)}(x)}{0.5\tau} - \Lambda [k_{1ij} p_{1ij}^{(k)}] \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{1ij} \frac{\partial p_{1i}^{(k+1)}(y)}{\partial y} \right) - \frac{1}{0.5\tau} p_{1i}^{(k+1)}(y) = -\frac{p_{1i}^{(k+0.5)}(y)}{0.5\tau} - \Lambda [k_{1ij} p_{1ij}^{(k+0.5)}] \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{2ij} \frac{\partial p_{2j}^{(k+0.5)}(x)}{\partial x} \right) - \frac{R^*}{0.5\tau} p_{2j}^{(k+0.5)}(x) = -\frac{p_{2j}^{(k)}(x)}{0.5\tau} - \Lambda [k_{2ij} p_{2ij}^{(k)}] \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{2ij} \frac{\partial p_{2i}^{(k+1)}(y)}{\partial y} \right) - \frac{R^*}{0.5\tau} p_{2i}^{(k+1)}(y) = -\frac{p_{2i}^{(k+0.5)}(y)}{0.5\tau} - \Lambda [k_{2ij} p_{2ij}^{(k+0.5)}]. \end{array} \right. \quad 4.9$$

Бу ерда:

$$k_1 = \frac{k_p}{\mu_1}; \quad k_2 = \frac{k_p}{\mu_2};$$

$$\Lambda [k_{1ij} p_{1ij}^{(k)}] = \frac{k_{1i-0.5,j} p_{i-1,j}^{(k)} - (k_{1i-0.5,j} + k_{1i+0.5,j}) p_{ij}^{(k)} + k_{1i+0.5,j} p_{i+1,j}^{(k)}}{h_{xy}^2},$$

$$\Lambda [k_{1ij} p_{1ij}^{(k+0.5)}] = \frac{k_{1i,j-0.5} p_{ij-1}^{(k+0.5)} - (k_{1i,j-0.5} + k_{1i,j+0.5}) p_{ij}^{(k+0.5)} + k_{1i,j+0.5} p_{i,j+1}^{(k+0.5)}}{h_{xy}^2},$$

$p_{i,j}^{(0)}$ - k -вақт қатламидаги босим функцияси ;

$p_{i,j}^{(1)}$ - $k+0.5$ -вақт қатламидаги босим функцияси.

Бу (4.9) чекли айирмали дифференциал тенгламалар тизими ҳар бир x_i ўзгарувчи йўналишида дифференциал прогонка усулини қўллаган ҳолда бошланғич шартлар билан ечим $k+0.5$ вақт қатлами учун ечилади ва худди

шундай $k+1$ қатламида ҳар бир y_j ўзгарувчи йўналишида ечилади. Бунда бошланғич шарт сифатида $k+0.5$ қатламида топилган ечим олинади.

Дифференциал прогонка усули ғоясига асосланиб (4.9) дифференциал айирмали масаланинг биринчи тенгламаси учун чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда умумий ечимини қуйидагича ёзиш мумкин

$$P_i(x) = \frac{\gamma_i(x)U_i(x) - \alpha_i(x)w_i(x)}{\alpha_i(x)v_i(x) - \beta_i(x)U_i(x)};$$

$$\frac{dP_i}{dx} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\gamma_i(x)v_i(x) - \beta_i(x)w_i(x)}{\alpha_i(x)v_i(x) - \beta_i(x)U_i(x)}.$$
(4.10)

Бу ечим ноаналум x йўналиш бўйича барча нуқталарда y ўзгарувчининг барча нуқталарида босим функцияси қийматларини ва унинг биринчи тартибли дифференциали қийматларини аниқлаб беради. Бу ерда дифференциал прогонка ўнг ва чап коэффициентлари $u(x)$, $v(x)$, $w(x)$ ва мос равишда, $\alpha(x)$, $\beta(x)$, $\gamma(x)$ лар Коши масаласининг ечими сифатида топилади. Чап прогонка коэффициентлари учун Коши масаласи қуйидаги кўринишда бўлади

$$\begin{cases} k_i \frac{du_i}{dx} = v_i \\ \frac{dv_i}{dx} = Q_i u_i \\ \frac{dw_i}{dx} = R_i u_i \end{cases} \quad (4.11)$$

Бу тенгламалар тизими учун бошланғич шартлар чегаравий шартдан фойдаланилиб фильтрация соҳасининг чап томонидан аниқланади

$$u_1 = u_{10} / k_1, \quad v_1 = v_{10}, \quad w_1 = w_{10} \quad (4.12)$$

Ўнг прогонка коэффициентлари учун Коши масаласи қуйидаги кўринишда бўлади

$$\begin{cases} k_i \frac{d\alpha_i}{dx} = \beta_i \\ \frac{d\beta_i}{dx} = Q_i \alpha_i \\ \frac{d\gamma_i}{dx} = R_i \alpha_i \end{cases} \quad (4.13)$$

Бу тенгламалар тизими учун бошланғич шартлар (4.14) чегаравий шартдан фойдаланилиб фильтрация соҳасининг ўнг томонидан аниқланади

$$\alpha_n = \alpha_{10} / k_n, \quad \beta_{n1} = \beta_{n0}, \quad \gamma_{n1} = \gamma_{n0} \quad (4.15)$$

Худди шундай, дифференциал прогонка усули ғоясига асосланиб (4.15) дифференциал айирмалари масаланинг иккинчи тенгламаси учун чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда умумий ечимини юқоридаги каби ёзиш мумкин.

$$P_j(y) = \frac{\gamma_j(y)U_j(y) - \alpha_j(y)w_j(y)}{\alpha_j(y)v_j(y) - \beta_j(y)u_j(y)}; \quad (4.16)$$

$$\frac{dP_j}{dy} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\gamma_j(y)v_j(y) - \beta_j(y)w_j(y)}{\alpha_j(y)v_j(y) - \beta_j(y)u_j(y)}.$$

Бу (4.16) ечим номалум y йўналиш бўйича барча нуқталарда x ўзгарувчининг барча нуқталарида босим функцияси қийматларини ва унинг бирича тартибли дифференциали қийматларини аниқлаб беради. Бу ерда дифференциал прогонка ўнг ва чап коэффициентлари $u(y)$, $v(y)$, $w(y)$ ва мос равишда, $\alpha(y)$, $\beta(y)$, $\gamma(y)$ лар Коши масаласининг ечими сифатида топилади.

Чип прогонка коэффициентлари учун Коши масаласи қуйидаги кўринишда бўлади

$$\begin{cases} k_i \frac{du_i}{dy} = v_i \\ \frac{dv_i}{dy} = Q_i u_i \\ \frac{dw_i}{dy} = R_i u_i \end{cases} \quad (4.17)$$

Бу дифференциал тенгламалар тизими учун бошланғич шартлар чегаравий шартдан фойдаланилиб фильтрация соҳасининг чап томонидан аниқланади

$$u_1 = u_{10} / k_1, \quad v_1 = v_{10}, \quad w_1 = w_{10} \quad (4.18)$$

Ўнг прогонка коэффициентлари учун Коши масаласи қуйидаги кўринишда бўлади

$$\begin{cases} k_i \frac{d\alpha_i}{dy} = \beta_i \\ \frac{d\beta_i}{dy} = Q_i \alpha_i \\ \frac{d\gamma_i}{dy} = R_i \alpha_i \end{cases} \quad (4.19)$$

Бу дифференциал тенгламалар тизими учун бошланғич шартлар чегаравий шартдан фойдаланилиб фильтрация соҳасининг ўнг томонидан аниқланади

$$\alpha_n = \alpha_{n0} / k_n, \quad \beta_{n1} = \beta_{n0}, \quad \gamma_{n1} = \gamma_{n0} \quad (4.20)$$

Бу олинган дискрет моделни компьютерда амалга ошириш унча қийинчилик туғдурмайди. Уни қуйидаги икки бочқичли кетма-кетликда амалга ошириш мумкин:

Биринчи босқич. Коши масаласи учун бошланғич шартлар масаланинг чегаравий шартларидан аниқланади; Коши масаласи бошланғич шарт билан Рунге Кутта ёки Кутта Мерсон процедураси ёрдамида x ўқининг барча

йўналишларидаги нуқталарда чапдан ўнгга қараб ечилади; Коши масаласи бошлангич шарт билан Рунге-Кутта ёки Кутта-Мерсон процедураси ёрдамида ўқининг барча йўналишларидаги нуқталарда ўнгдан чапга қараб ечилади; унинг бирича тартибли дифференциал қийматлари аниқланади, яъни шундай қилиб, босим функциясининг вақт бўйича ярим қадамдаги нефт қатлами соҳасининг барча нуқталарида қийматлари топилади.

Иккинчи босқич. Вақт бўйича ярим қадам силжиймиз ва кейинги $k+1$ қадам учун босим функцияси қийматларини нефт соҳасининг бирча нуқталарида топамиз. Бу босқич биринчи босқич каби амалга оширилади.

Коши масаласини Рунге-Кутта усулида ечиш жараёни прогонка коэффициентлари ва шу усул коэффициентларига ҳар қадамда номировка процедурасини қўллаш билан амалшга оширилади.

Ҳар бир қадамда чап томон учун коши масаласидаги берилган U_{i+1} векторини ҳисоблашда ўнг тамондаги U_i вектори ўрнига нормаллаштирилган \bar{U}_i ($U=(u,v,w)$) вектори қўйилади. Худди шундай чап томондан ўнг томонга қараб Коши масаласини ечишда A_{i-1} векторни ҳисоблашда ўнг тамондаги A_i вектори ўрнига нормаллаштирилган \bar{A}_i ($A=(\alpha,\beta,\gamma)$) вектори қўйилади. Нормировка процедураси, агарда танланган усул турғунликни сақласа унда қўлланилмайди.

Дифференциал прогонка усулини қўллаш фазалар орасидаги патокларнинг узлуксизлиги ва босимнинг узулишга эга эмаслик шартларини ҳисоблаш жараёнида автоматик тарзда ҳисобга олиш имконини беради.

Демак, икки ўлчамли дифференциал тенглама учун силжувчи чегарага эга бўлган чегаравий масалани ечишда кўндаланг кесим схемасидан фойдаланиб масалани дифференциал-айирмали масалага олиб келиш ва уни дифференциал прогонка усулини қўллаш ёрдамида ечиш катта қийинчилик олиб келмайди.

4.3. Дискрет моделда ички ва ташқи шартларни ҳисобга олиш

Сонли моделлаштириш учун нефт қатламининг бошланғич ҳолатини (бошланғич шартини), уни чегараловчи ички ва ташқи шартларни ҳисобга олиш лозим. Чегаравий шарт нефт ёки газ қатламини уни ўраб олган соҳа билан таъсирини аниқлайди. Бу шартлар моделлаштирилаётган соҳанинг ички ва ташқи чегаралари кўринишида, ҳамда нефт ёки газ қудуқлари шартлари кўринишида ёки ички фазалар алмашуви чегарасида берилиши мумкин.

Барча типдаги фильтрация масалалари учун бир хил бўлган шарт бу ташқи шарт бўлиб, у фильтрация соҳаси чегарасида берилади.

Нефт ва газ қатламларини моделлаштиришда фильтрация соҳасининг Γ чегарасида энг кўп тарқалган чегаравий шартлар кўриниши асосан учта чегаравий шартлар кўринишида берилиши мумкин: биринчи тартибли чегаравий шарт; иккинчи тартибли чегаравий шарт; аралаш ҳолдаги чегаравий шартлар [].

- биринчи тартибли чегаравий шарт (Дирихле шарти). Бу шарт фильтрация чегарасида босим функцияси бирор маълум функция ёки қийматга тенг бўлган ҳолларда берилади, масалан, босим функцияси:

$$P|_{\Gamma} = f(t)$$

Бу ерда $f(t)$ – функция Γ чегарада маълум бўлган функция.

Маълумки, дифференциал прогонка усули ёрдамида сонли моделлаштиришда прогонка коэффициентлари оддий дифференциал тенгламалар тизими учун Коши масаласини ечиш орқали топилади. Бунда Коши масаласи учун бошланғич шартларни аниқлаш чап ва ўнг тамондаги чегаравий шартлардан аниқланади. У ҳолда Коши масаласи учун бошланғич шартлар қуйидаги кўринишда бўлади:

$$U=0; V=1; W=f_i(t) \quad \text{чап томон чегаради } x=0$$

$$A=0; B=1; C=f_2(t) \quad \text{ўнг томон чегарада } x=l$$

- иккинчи чегаравий шарт (Нейман шарти). Бунда фильтрация соҳаси чегарасида оқим (поток) берилади:

$$\frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = f(t)$$

Агар $f(t)=0$, у ҳолда чегара ёпиқ эканлигини англатади, яъни чегарада оқим йўқлигини билдиради.

$$\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{\Gamma} = 0, \quad \frac{k_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \Big|_{\Gamma} = 0$$

Бу шартда чегарада Коши масаласини ечишда бошланғич шартни аниқлаш кўйидагича бўлади:

$$U=1; V=0; W=0 \quad \Gamma \text{ контурининг чап томонида};$$

$$A=1; B=0; C=0 \quad \Gamma \text{ контурининг ўнг томонида}.$$

- аралаш чегаравий шартлар. Бу ҳолатда икки ўлчовли масала учун фильтрация соҳасини айрим қисмларида биринчи, айрим жойларида иккинчи ёки учунчи чегаравий шартлар берилиши мумкин. Бу шартларни умумий қилиб кўйидаги кўринишда ёзиш мумкин.

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \alpha(P_A - P); \quad (x, y) \in \Gamma$$

Бу ерда

P -босим функцияси;

P_A –чегарага яқин босим;

α -0 ёки 1 қийматни қабул қилувчи параметр.

Бундай ҳолда ҳам Коши масаласининг бошланғич шартлари худди юқоридаги каби аниқланади:

$$U=1; V=1; W= P_A \quad \Gamma \text{ контурининг чап томонида};$$

$A=1; B=1; C=P_A$ Γ контурининг ўнг томонида.

Кўп соҳали фильтрация масалаларини дифференциал прогонка усулида ечишда ички шартлар автоматик равишда бажарилади.

4.4. Асосий кўрсаткичларини ҳисоблашнинг параллел самарали алгоритмлари

Дискрет моделни компьютерда сонли ечиш ишланмасини ишлаб чиқиш учун қуйидаги масаласини ечишнинг ҳисоблаш алгоритми қуйидагича бўлади:

1. Бошлаш.
2. Бошланғич маълумотларни киритиш: нефт қовушқоқлиги; катлам ўтказувчанлиги; ғоваклиги; нефт ва газ соҳаси учун упруго ёмкости коэффициентлари; дискрет соҳа ҳақидаги маълумотлар; вақт бўйича кадам; ечиш жараёни учун ажратилган вақт; кудуқлар дебити; катлам баландлиги ва бошланғич босим.
3. Сеткадаги дискрет кадамни аниқлаш.
4. Дискрет фильтрация соҳаси ҳақидаги маълумотларни қайта ишлаш.
5. Дискрет тенламалар тизимини x ўқи бўйича ҳар бир йўналишда ўзгарувчилар йўналиши схемасини қўллаб дифференциал прогонка усулида ечиш:

5.1. Нефт контури чап қисмида $u(x)$, $v(x)$, $w(x)$ прогонка коэффициентлари чегаравий шартдан бошланғич қийматларини аниқлаш;

5.2. Прогонка коэффициентлари $u(x)$, $v(x)$, $w(x)$ ($j=1,2,3, \dots, n$) қийматларини Рунге - Кутта усули билан тенгламалар тизимини ечиш билан аниқлаш (тўғри юриш билан);

5.3. Нефт контури ўнг қисмида $\alpha(x)$, $\beta(x)$, $\gamma(x)$ прогонка коэффициентлари чегаравий шартдан бошланғич қийматларини аниқлаш;

5.4. Прогонка коэффициентлари $\alpha(x)$, $\beta(x)$, $\gamma(x)$ ($j=n, n-1, n-2, \dots, 1$) қийматларини Рунге - Кутта усули билан тенгламалар тизимини ечиш билан аниқлаш (тескари юриш билан);

5.5. Қатламда босим қийматларини ҳисоблаш Р.

5.1. - 5.5. пунктлари барча $i=1,2,\dots,m$ ларда такрорланади.

6. Дискрет тенламалар тизимини y ўқи бўйича ҳар бир йўналишда ўзгарувчилар йўналиши схемасини қўллаб дифференциал прогонка усулида ечиш:

6.1. Нефт контури чап қисмида $u(y)$, $v(y)$, $w(y)$ прогонка коэффициентлари чегаравий шартдан бошланғич қийматларини аниқлаш;

6.2. Прогонка коэффициентлари $u(y)$, $v(y)$, $w(y)$ ($ij=1,2,3, \dots, n$) қийматларини Рунге - Кутта усули билан тенгламалар тизимини ечиш билан аниқлаш (тўғри юриш билан);

6.3. Нефт контури ўнг қисмида $\alpha(y)$, $\beta(y)$, $\gamma(y)$ прогонка коэффициентлари чегаравий шартдан бошланғич қийматларини аниқлаш;

6.4. Прогонка коэффициентлари $\alpha(y)$, $\beta(y)$, $\gamma(y)$ ($i=m, m-1, m-2, \dots, 1$) қийматларини Рунге - Кутта усули билан тенгламалар тизимини ечиш билан аниқлаш (тескари юриш билан);

6.5. Қатламда босим қийматларини ҳисоблаш P .

6.1. - 6.5. пунктлари барча $j=1,2,\dots,m$ ларда такрорланади.

7. Ҳисоблашнинг умумий вақти текширилади. Агра $t_k > T$, бўлса 8 қадамга ўтилади акс ҳолда кейинги қадам учун ҳисоблаш жараёни амалга оширилади.

8. Тамом.

Шуни таъкидлаш лозимки, дифференциал прогонка усулини дифференциал-айирмали масалани ечишда қўллаш кўп соҳали филтрацион жараёнларни ҳисоблашда қуйидаги имкониятларни беради:

- бир фазадан иккинчи фазага ўтишда махсус боғланишларга ҳожат шарт эмас, чунки ички шартлар автоматик равишда бажарилади;

- Прогонка коэффициентларига нисбатан ечиладиган Коши масаласини таиқли бўлган Рунге Кутта ёки Кутта Меерсон усули етарлича аниқликда ечишга имкон беради. Булар учун мос дастурий таъминотлар ҳам мавжуд;

- Рунге Кутта усулида Коши масаласини сонли интеграллаш жараёнида прогонка коэффициентлари ва Рунге кутта усули коэффициентлари учун нормировка процедурасини қўллаш ҳисоблаш жараёнининг турғунлигини таъминлайди. Ҳар бир итерацион қадамда U_{i+1} векторини ҳисоблашда

тизимнинг ўнг томонига нормировка қилинган U_i вектори қиймати қўйилади.

Бу ўз навбатида Коши масаласини ечишда турғунликни таъминлайди;

- фильтрация соҳаси ички хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда тўғридан тўғри ҳисоблашларни амалга оширади;

- тизим учун ҳисоблаш жараёнининг абсолют турғунлигини таъминлайди.

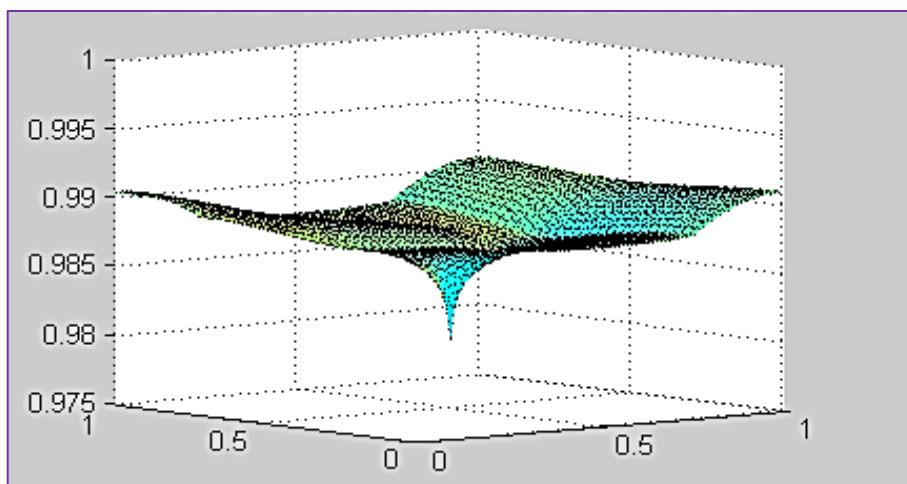
Ишлаб чиқилган алгоритм барча шунга ўхшаш масалалар учун ҳам ПЭХМда унинг дастурини ҳеч қийинчиликларсиз осон яратиш имконини беради.

4.5. Ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш ва тадқиқот таҳлили

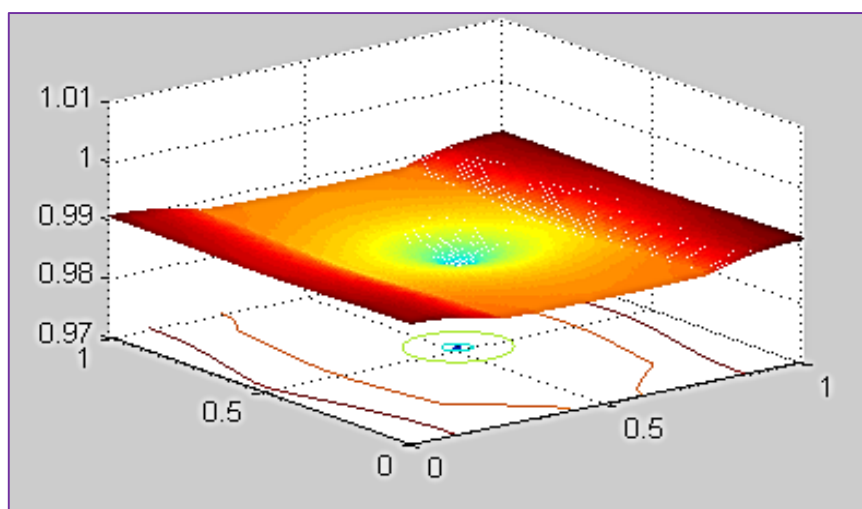
Ҳисоблаш таҳлилларини ўтказиш мақсадида нефт фильтрация қатлами учун дастурга киритилувчи параметрлар қийматлари қуйидагича олинган.

Киритиладиган маълумотлар	Белгилашлар	Сон қийматлари ва ўлчамлари	Идентификатор белгиси
Фильтрация қатламининг бошланғич босими	P	300 атм.	PH
Нефт қовушқоқлиги	μ	3 - 4 Спуаз	Mu
Қатлам ўтказувчанлиги	k	0.01 - 0.1 Дарси	K
Қатлам упругаёмкости	β	$10 \cdot 10^{-6}$ см ² /кгс	Mb
Қудуқ дебети	Q	400 м ³ /сут	Qd
Фильтрация соҳаси характерли узунлиги	L	10000метр	L
Ҳисоблаш умумий вақти	T	1080 сутка	Tu
Ҳисоблаш қадами вақти	DT	24 сутка	Dt

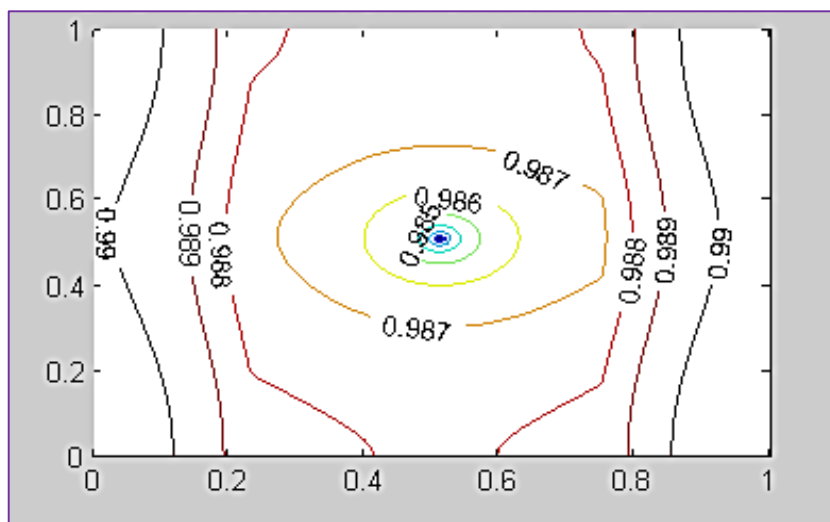
Бу юқоридаги параметрлар қийматлари асосида ҳисоблаш тажрибалари ўтказилган. Ҳисоблаш тажрибалари нефт конларининг 3 йиллик ишлаши натижалари асосида келтирилган.



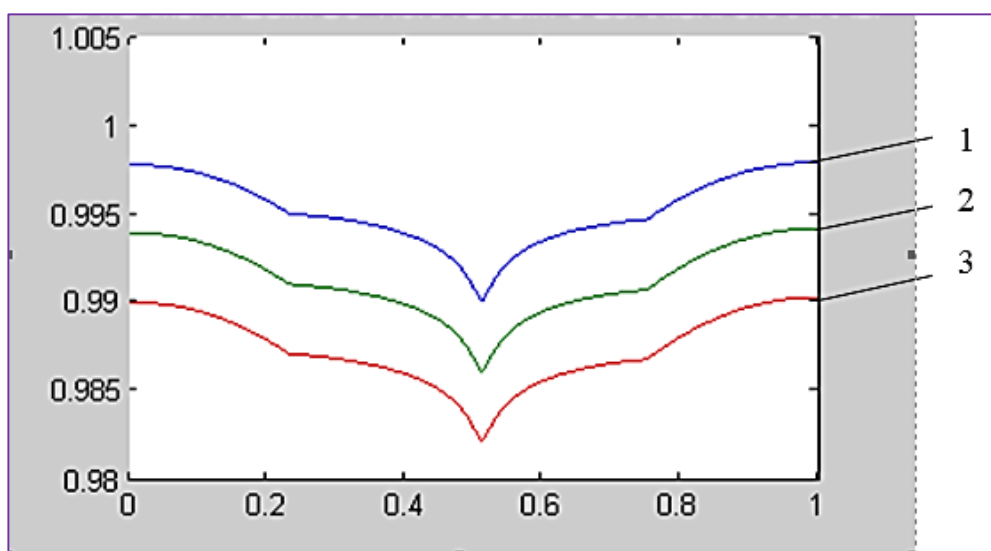
2.2-расм. Қатламда босим ўзгаришининг 3D графиги
(пастки-ён тарафдан кўриниш)



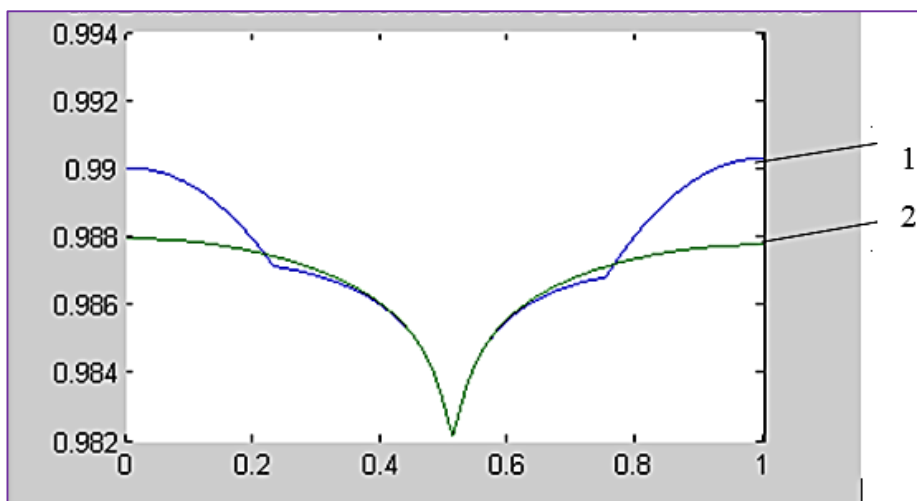
2.3-расм. Қатламда босим ўзгаришининг 3D графиги
(устки-ён тарафдан кўриниш)



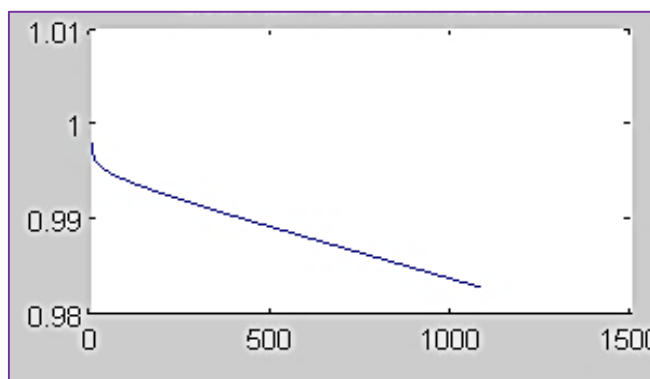
2.4-расм. Қатламда босим ўзгаришининг
контур графиги



2.5-расм. Қатлам ва қудукда босим ўзгаришининг
кўндаланг кесимдаги графиги (x – бўйича)
1-360сут., 2-720сут., 3-1080сут.



2.6-расм. Қатлам ва қудуқда босим ўзгаришининг кесимлардаги графиги (1080 сутка, 1-х бўйича, 2-у бўйича)



2.7-расм. Қудуқда вақт бўйича босим тушуши (1080 сутка)

2.2-2.7-расмларда ўтказувчанлик коэффиценти қийматлари кучли бўлганда, яъни катта фарқ билан ҳар хил қийматдаги нефт қатламида босимнинг тарқалиш ҳолати келтирилган. Олинган ҳисоблаш натижалари шуни кўрсатадики ўтказувчанлик коэффиценти қиймати катта бўлган зоналарда қатламдаги босимнинг тарқалиш тезлиги ошади. Бу расмларда қудуқ атрофида ўтказувчанлик коэффиценти кичик бўлгани сабаб, қудуқ атрофида босимнинг тушуши кузатилмоқда.

Марказда қудуқ жойлашган ҳисобига ва қатлам ўтказувчанлик коэффиценти қийматлари соҳа x ўқи бўйича бўлакли бир жинсли бўлмаган

ҳолат учун натижадан кўриниб турибдики x ўқининг 0.3 ва 0.7 нуқталарда графикларда саниш кузатилмоқда. Бу шуни кўрсатадики бу нуқталарда тенгламанинг $k(x)$ коэффиценти ўз қийматини катта фарқ билан ўзгартиради, яъни

$$k(x) = \begin{cases} 0.05 & 0 \leq x \leq 0.3 \\ 0.5 & 0.3 < x < 0.7 \\ 0.05 & 0.7 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСА

1. Ғовак муҳитда суюқликларнинг икки ўлчамли филтрланиш жараёнини сонли моделаштиришда ўзгарувчилар йўналиши схемасини ва прогонка усули ёрдамида масаланинг дискрет моделини ишлаб чиқилди.
2. Ғовак муҳитда нефт ва газ филтрланиш жараёни учун қурилган икки ўлчамли чегаравий масалани ечиш учун ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди.
3. Нефт газ конлари ишлаши асосий кўрсаткичларини аниқлашнинг автоматлаштирилган тизими учун комплекс дастурий таъминот ишлаб чиқилди.
4. Ишлаб чиқилган “Нефт ва газ конлари ишлашининг асосий кўрсаткичлари бўйича ҳисоблаш тажрибаларини ўтказишнинг компьютерда визуаллаштиришни моделлаштириш” комплекс дастури ёрдамида нефт ва газ қатламлари ўтказувчанлик ва ғоваклик коэффицентлари, ҳамда кудуқлар дебитининг турли қийматлари бўйича ҳисоблаш тадқиқотлари ўтказилиб, олинган натижалар таҳлил қилинди.

Ишлаб чиқилган математик-дасатурий восита нефть конлари асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш ва сонли натижаларни визуал формада график объектлар кўринишида тақдим этиш имконини беради. Бу эса ўз навбатида турли бўлакли бир жинсли бўлмаган нефт ва газ конлари ишлаш жараёнини тадқиқ қилиш ишларини амалга оширишда катта хизмат қилади.

Математик ва дастурий таъминотни нефт конлари ишлашини таҳлил қилиш ва башоратлаш, ҳамда янгиларини лойиҳалаш ишларида қўллаш мумкин.

V БОБ. НЕФТЬ КОНЛАРИНИ ЎЗЛАШТИРИШДА ФИЛЬТРАЦИЯ АСОСИЙ КЎРСАТКИЧЛАРИНИ ТАҲЛИЛ ВА БАШОРАТ ҚИЛИШ ПАРАЛЛЕЛ ҲИСОБЛАШ ДАСТУРИ

Ушбу бобда нефть ва газ конларини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини ҳисоблашда иккинчи ва учинчи бобларда ишлаб чиқилган параллел ҳисоблаш алгоритмлари асосида тузилган дастурий мажмуанинг яратилиш усуллари ва самарали ҳисоблаш жараёнларини *автоматлаштириш* ва унинг структураси, дастурий интерфейси ҳамда ҳисоблаш тажрибаларининг сонли натижаларини визуаллаштириш масалалари қаралган.

5.1. Филтрация жараёнини таҳлил қилиш ва башоратлашда ҳисоблаш дастурий таъминотининг асосий хусусиятлари

Нефть ва газ қазиб олиш жараёнида қатламларнинг гидродинамик параметрларини аниқлаш учун ғовакли муҳитда суюқлик ва газни филтрация чегаравий масалаларини ечишни *автоматлаштириш*, нефть ва газ конларини лойиҳалаш, филтрация жараёнини таҳлил қилиш ва башоратлашни тезлаштиришга имкон беради. Шу сабабли гўвак муҳитда нефтьнинг филтрация жараёнини ўрганиш учун *автоматлаштирилган* тизимларни қуриш ва ундан самарали фойдаланиш турли хилдаги маълум бир соҳага тегишли масалаларни ечиш учун зарур.

Автоматлаштирилган тизимлар деганда:

самарали алгоритмлар мажмуи боʻлган ва алоҳида синф масалаларини ечишнинг турли усулларини амалга оширувчи дастурий модуллар мажмуасидан иборат дастурлар тоʻплами тушунилади;

берилган дастлабки маълумотларга асосланиб, муайян муаммонинг ўзига хос хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда, унинг оптимал ечимини

автоматлаштирилган ҳолда танлашни таъминловчи ва натижавий ечим сифатини кафолатловчи дастурни бошқариш;
фойдаланувчининг тизим билан алоқаси қулайлигини таъминловчи, иш тажрибасини тўplash, тўлдириш ва қайта ишлашни таъминлайдиган хизмат кўрсатиш дастурлари тўплами [40].

Суюқлик ва газларнинг ғовак муҳитда филтрация масалаларини ечишга имкон берувчи турғун ҳисоблаш схемаларини, самарали алгоритмларни ва дастурлар мажмуасини ишлаб чиқиш, олинган сонли натижаларнинг ишончилигини сезиларли даражада оширади ва ҳисоблаш жараёнини тезлаштиради. Бундай самарали ҳисоблашлар ўз-ўзидан нефть конларини ўзлаштиришда унинг асосий кўрсаткичлари бўйича таҳлил ва башорат қилишни яхшилайти ва ишончли натижаларга эришиш имконини беради.

Ғовакли муҳитдаги суюқликлар филтрация жараёнининг мураккаблиги яратиладиган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастур модулларининг уневерсаллиги ҳамда самарадорлигини талаб этади. Бундаги мураккаблик, филтрация соҳасининг исталган формада бўлишида, қатламларнинг бир жинслимаслиги ва мураккаб конфигурацияли соҳанинг етарлича катта майдонларда филтрация оқимини ҳисоблаш зарурати билан боғлиқлигидадир.

Кўриб чиқилаётган тизим қуйидагилардан иборат бўлиши керак:

- дастурий модуллар тўплами, улар алоҳида синфлар муаммоларини ҳал қилишнинг турли усулларини амалга оширадиган алгоритмлардан ташкил қилинган;
- берилган дастлабки маълумотларга асосланиб, унинг ўзига хос хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда ва олинган ечимнинг сифатини

кафолатлайдиган аниқ бир муаммонинг оптимал ечимини автоматлаштирилган ҳолда танлашни таъминлайдиган бошқарув дастури;
- фойдаланувчи ва тизим ўртасидаги мулоқот қулайлигини таъминловчи, иш тажрибасини қайта ишлашни таъминлайдиган хизмат кўрсатиш дастурлари мажмуаси.

Тизимда ҳисоблаш жараёнини ташкил этиш қуйидаги асосий тамойилларга асосланади:

- **Дастурларнинг модуллиги.** Дастурлашнинг модулли принципи ҳисоблаш жараёнини ташкил этишда асосий компонент сифатида қаралади. У бир қатор афзалликларни беради: бир хил модулдан қайта фойдаланиш имконияти; ҳисоблаш жараёнларини *автоматлаштиришни* ташкил этиш; олдиндан ишлаб чиқилган модуллардан фойдаланиш орқали ҳар бир алоҳида йирик дастурни яратиш вақтини қисқартириш; модулларни аниқ вазифа шартларига тез мослаштириш ва бошқалар;
- **Фойдаланиш қулайлиги.** Мажмуадан фойдаланишнинг максимал қулайлиги вазифаларни ихчам шакллантириш имконини беради;
- **Самарадорлик.** Мажмуа маълум бир синф муаммоларига қўлланилганда муаммони ҳал қилиш усуллари самарали танлашни таъминлаши керак.

Ҳозирги вақтда дастурий таъминот сифатини баҳолашнинг турли хил моделлари ва усуллари мавжуд. Бу усулларда дастурларни лойиҳалаш ва ишлаб чиқишда дастурий таъминот сифатининг (самарадорлиги) қуйидаги асосий хусусиятлари ҳисобга олинди:

1. Тезлик - дастурларнинг чекланган вақт ичида ўз функцияларини бажариш қобилияти; танланган ҳисоблаш алгоритмлари, маълумотлар ҳажми

ва тузилиши, бошқарув элементлари, киритиш-чиқариш, диагностика ва бошқалар билан аниқланади.

2. Универсаллик - кенг тоифадаги муаммоларни ҳал қилиш учун дастурлардан фойдаланиш қобилияти; ҳисоблаш алгоритмларининг универсаллиги ва фойдаланиладиган воситаларнинг тўлиқлиги билан белгиланади.

3. Аниқлик -турли амалий дастурлардан фойдаланиш учун улардаги ҳисоб-китобларнинг аниқлиги етарли бўлиши керак.

4. Барқарорлик (турғунлик) - дастурларнинг маълум чекловларни бузган ҳолда нормал ишлаш қобилиятини назарда тутди.

5. Мобиллик (портативлик) -компютерларнинг бошқа турлари ва конфигурациясидаги дастурлардан фойдаланиш, бошқа дастурий таъминотга уланиш ёки бошқа пакетларда алоҳида кичик дастурлардан фойдаланиш қобилияти.

5.2. Нефть конларини ўзлаштириш асосий кўрсаткичларини ҳисоблашда параллел алгоритмлар самарадорлигини аниқлаш дастурий мажмуи

Нефть ва газ конларини ўзлаштиришда унинг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш учун турғун ҳисоблаш схемалари, универсал ва юқори самара берувчи ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий таъминотларни ишлаб чиқиш ҳамда ундан унумли фойдаланиш ҳисобланадиган сонли натижаларнинг ишончилигини янада оширади, ҳисоблашни бир неча баробарга тезлаштиради ва сонли натижаларни турли хилдаги графикларда визуал формада тақдим этиш имкониятини яратади. Яратилган ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш дастурий таъминоти нефть ва газ

конларини лойиҳалашни, таҳлил қилиш ва башоратлашни тезлаштиради. Шу сабаб бундай дастурий таъминотлар ёрдамида ҳисоблаш тажрибаларини ўтказишда замонавий компьютерлардан фойдаланиш самарадорликни оширади.

Matlab дастурий воситасида иккинчи ва учинчи бобда келтирилган оддий кетма-кет ва параллел ҳисоблаш алгоритмларидан фойдаланиб тегишли интерфейсга эга бўлган нефть конларини оʻзлаштиришнинг асосий кўрсаткичларини ҳисоблаш ҳамда ҳисоблаш самарадорликларини аниқлаш бўйича “Нефть конларини ўзлаштиришда унинг асосий кўрсаткичларини самарали алгоритм асосида ҳисоблаш дастурий мажмуи” номли дастурий мажмуа ишлаб чиқилди. Дастурий мажмуа ғовак муҳитда нефть филтрациясининг икки ва уч ўлчовли амалий масалаларини сонли усулларда ечиш имконини беради.

Ишлаб чиқилган дастурий таъминотлар тўпламининг функционал диаграммаси 4.1-расмда кўрсатилган. Бу расмда икки ва уч ўлчовли чегаравий масалаларни ечиш учун модуллар ўртасидаги алоқалар кўрсатилган.



5.1 -расм. “Нефть конларини ўзлаштиришда унинг асосий кўрсаткичларини самарали алгоритм асосида ҳисоблаш дастурий мажмуи”нинг функционал схемаси

Ҳисоблашни амалга ошириш учун керакли масалани танлаш лозим:

- ғовак муҳитда нефть филтрацияси икки ўлчовли масаласи;
- ғовак муҳитда нефть филтрацияси уч ўлчовли масаласи.

Масалалар блоки, дастлабки маълумотларни олиш учун унинг модуллари блоки билан ўзаро алоқада бўлади.

Дастлабки маълумотларни бериш модуллари блоки қуйидаги модуллари ўз ичига олади:

- қатлам параметрлари бўйича дастлабки маълумотларни шакллантириш модули;
- дискрет филтрация майдони конфигурациясининг ахборот массивини шакллантириш модули;
- қатлам ўтказувчанлигини бўйича ахборот массивини шакллантириш модули;
- қатлам баландлиги бўйича ахборот массивини шакллантириш модули;
- Қудуқлар дебити ва координаталарини бериш бўйича ахборот массивини шакллантириш модули.

Ҳар бир масалани ечишни бошлаш ҳисоблаш блокидан бошланади. Бу блокда асосий кўрсаткичлар ҳисобланади, у қуйидаги модуллар ташкил топган:

- чекли айирмали тенгламанинг коэффициентларини ҳисоблаш модули;
- чекли айирмалар усулини амалга ошириш (оддий ҳайдаш усулида, учрашув-ҳайдаш усулида) модули;
- дифференциал айирмалар усулини амалга ошириш (Рунге Кутта, Кутта Мерсон усулларида) модули;
- параллел ҳисоблаш самарадорлигини ҳисоблаш модули.

Ҳисоблашни амалга ошириш блоки натижаларни сақлаш ва чиқариш блоки билан ўзаро боғлиқ ҳолда ишлайди. Натижаларни сақлаш ва чиқариш

блокида ҳисоблаш тажриба натижаларини сақлаш ва визуаллаштириш модуллари мавжуд. Улар қуйидаги ишларни амалга оширади:

Оралик натижаларни жадвал кўринишида чиқариш.

Тажриба ҳисоблаш натижаларини исталган кесимларда графикларда тақдим этиш.

Қатламда босим тарқалишининг контур графигини тақдим этиш.

Ҳисоблаш натижаларини 3D графикларда тақдим этиш.

Қудуқларда вақт бўйича босим ўзгариши графикларини тақдим этиш.

Қатламда босим ўзгариши анимациясини тақдим этиш.

Нефть конлари ишлашида филтрация жараёнининг асосий кўрсаткичлари бўйича ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун дастурда қуйидаги дастлабки маълумотларни бериш талаб этилади:

Умумий вақт – бунда нефть конлари ишлашининг тўлиқ вақти суткада берилади (масалан, нефть конлари асосий кўрсаткичларининг уч йиллик ҳисобини амалга ошириш учун 1080 сутка берилади).

Бошланғич босим – бунда нефть қатламидаги бошланғич босим назарда тутилади, масалан, 200 атм. Амалда 100 дан 300 атм. Оралиғда бўлади.

Вақт бўйича қадам – 24 соат, яъни бир сутка берилган. Қадам ярим ва икки сутка оралиғида берилиши мақсадли.

Ўтказувчанлик - к -нефть қатламининг ўтказувчанлик коэффиценти. Уни 0.1 - 0.4 Дарси ўлчамида бериш мақсадлироқ.

Эластиклик коэффиценти – уни $2-3 \cdot 10^{-3}$ см²/кг атрофида олиш лозим.

Қовушқоқлик коэффиценти - нефтьнинг қовушқоқлиги, нефть учун 2, 3, 4, 5 гача, газ учун унинг хусусиятига қараб 0.01 дан 0.001 гача олиш тавсия этилади.

Нефть соҳаси узунлиги x бўйича – L_x 1 км дан 5 км гача ва ундан ҳам каттароқ ўлчамда бўлиши мумкин.

Нефть соҳаси узунлиги y бўйича – L_y 1 км дан 5 км гача ва ундан ҳам каттароқ ўлчамда бўлиши мумкин.

Нефть қатламининг қуввати h - қатлам баландлиги, масалан, 20 метр.

қудуқлар сони – нефть соҳасида ишлатиладиган қудуқлар сони.

қудуқдан бир суткада олинадиган нефть ҳажми (дебит).

қудуқ координатаси, x ўқи бўйича (қиймати 1 билан 100 оралиғида).

қудуқ координатаси, y ўқи бўйича (қиймати 1 билан 100 оралиғида).

Натижани экранга чиқариш ва файлга ёзиб боришнинг вақт бўйича қадами (масалан, ҳар 10 суткада чиқариш ва ёзишни билдиради).

Тўлиқ натижа ҳар бир 30 сутка вақт оралиғида Натижа. txt файлига ёзиб борилади.

Дастурий мажмуа интерфейслари қуйидаги 5.2, 5.3, 5.4 -расмларда келтирилган.



5.2 -расм. “Нефть конларини ўзлаштиришда унинг асосий кўрсаткичларини самарали алгоритм асосида ҳисоблаш дастурий мажмуи”нинг интерфейси

Нефт конларини ўзлаштириш асосий кўрсаткичларини ҳисоблашнинг икки ўлчамли масаласи

Нуқталар сони

Нефт конининг ишлаш вақти

Нефтли қатлам узунлиги

Қатламдаги бошланғич босим

Нефтни қовушқоқлиги

Қатлам эластиклиги

Қатлам ўтказувчанлиги

Ҳисоблаш қадами

Қудуқ дебити

Қатлам қалинлиги



Кетма-кет ҳисоблаш




Параллел ҳисоблаш

Ҳисоблаш

5.3 -расм. Икки ўлчовли масалани ечишда асосий кўрсаткичлар ва самарадорликни ҳисоблаш дастурининг интерфейси

Нефт конларини ўзлаштириш асосий кўрсаткичларини ҳисоблашнинг уч ўлчамли масаласи

Нуқталар сони	<input type="text" value="41"/>	
Нефт конининг ишлаш вақти	<input type="text" value="1080"/>	
Нефтли қатлам узунлиги	<input type="text" value="10000"/>	
Қатламдаги бошланғич босим	<input type="text" value="300"/>	
Нефтнинг қовушқоқлиги	<input type="text" value="5"/>	
Қатлам эластиклиги	<input type="text" value="0.0002"/>	
Қатлам ўтказувчанлиги	<input type="text" value="0.1"/>	
Ҳисоблаш қадами	<input type="text" value="1"/>	
Қудуқ дебити	<input type="text" value="10000"/>	
Қатлам қалълиги	<input type="text" value="10"/>	

Кетма-кет ҳисоблаш
 Параллел ҳисоблаш

5.4 -расм. Уч ўлчовли масалани ечишда асосий кўрсаткичлар ва самарадорликни ҳисоблаш дастурининг интерфейси

Дастурий мажмуа оддий ва мураккаб формага эга бўлган нефть конлари филтрация соҳаси конфигурацияси учун, ҳисоблаш жараёни сонли натижаларини 3D график ҳамда кесимлар босим тарқалиши ва қудуқларда босим тушишини визуаллаштириб беради. Ҳисоблаш тажрибаларининг сонли натижаларини визуал формада тақдим этиш, ўз навбатида филтрацион жараёни тасаввур этиш, нефть конлари қатламларида уларни қазиб олиш жараёнининг гидродинамик ҳолатини ўрганишда, айниқса нефть конларини лойиҳалашда, таҳлил ва башорат қилишда катта рол ўйнайди.

БОБ БЎЙИЧА ХУЛОСАЛАР

Кўп ўлчовли масалани ечиш учун ишлаб чиқилган математик-дастурий таъминот ёрдамида асосий кўрсаткичлар ҳамда алгоритмнинг самарадорлик кўрсаткичлари бўйича ҳисоблаш тажрибалари ўтказилган ва параллел ҳисоблаш алгоритми бўйича тадқиқотлар қилинган. Ўтказилган тадқиқотлар, нефть конларини ўзлаштиришнинг асосий кўрсаткишлари ҳисоблаш жараёнини тезлаштириб беради, ҳамда таҳлил ва башоратлар қилишга хизмат қилади.

Ҳовак муҳитда нефтьнинг икки ва уч ўлчамли чегаравий масалаларини ечиш ва ҳисоблаш самарадорлигини оширишнинг янги “Нефть конларини ўзлаштиришда унинг асосий кўрсаткичларини самарали алгоритм асосида ҳисоблаш дастурий мажмуи” ишлаб чиқилди. Олинган сонли натижаларни 2D ва 3D графикларда визуаллаштириш имконини эга бўлинди.

ФҲЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР

1. Anjali Bala, Abhijeet Kumar, Nidhika Birla. Voice command recognition system based on MFCC and DTW. International Journal of Engineering Science and Technology. - Vol.2(12), 2010, 735-742 p.130
2. Badalyan, Z. You, K. Aji, P. Bedrikovetsky, T. Carageorgos, A. Zeinijahromi Size exclusion deep bed filtration: Experimental and modelling uncertainties Review of scientific instruments, 85 (1) (2014) 015111 [Google Scholar](#)
3. Bedrikovetsky P. , Upscaling of Stochastic Micro Model for Suspension Transport in Porous Media, Transport in Porous Media, 2008, vol. 75, pp. 335-369. [Google Scholar](#)
4. Blair-Chappell S., Stokes A. Parallel Programming with Intel Parallel Studio XE. – Indianapolis, Indiana: «John Wiley & Sons, Inc.», 2012. – 556 p.
5. Chetverushkin B.N., Churbanova N.G., Trapeznikova M.A. Simulation of oil production on parallel computing systems //High Performance Computing 1997: Grand Challenges in Computer Simulation (Ed. A. Tentner). SCS, San Diego, CA, 1997. - pp. 122-127.
6. Churbanova N.G., Trapeznikova M.A. Parallel simulation of oil production using explicit and implicit algorithms. In: ARCS'97. Vortr. der 14.ITG/GI-Fachtagung, September 8-11, 1997, Rostock, Deutschland (Hrsg. D.Tavangarian), VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach. - 1997. - pp.281-290.
7. Ciegis R., Iliev O., Lakdawala Z. On parallel numerical algorithms for simulating industrial filtration problems // Comput. Methods Appl. Math. 2007. Vol. 7, no. 2. Pp. 118-134.
8. David A. Patterson, John L. Hennessy. Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface – 5th ed. 2014.
9. Fadeev SI 1978 Methods of spline functions, Computing systems 75 (Novosibirsk) On the numerical solution of linear boundary value problems for

- ordinary differential equations by the differential sweeping method. [Google Scholar](#)
10. Galtsev O and Galtseva O 2015 Mathematical Modeling Maths. Physics 41 126
[Google Scholar](#)
 11. Ilic, Aleksandar. "Cache-aware Roofline model: Upgrading the loft". Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores Investigação e Desenvolvimento em Lisboa.
 12. Ismailov Sh.R. Harvard Educational and Scientific Review International Agency for Development of Culture, Education and Science // Numerical method for solving the problem of filtration of unstable groundwater and an effective computing algorithm
 13. Khalid A. Darabkh, Ala F. Khalifeh, Baraa A. Bathech. Efficient DTWBased Speech Recognition System for Isolated Words of Arabic Language //International Scholarly and Scientific Research & Innovation – 7(5) 2013.
 14. Kunle O., Lance H., James L. Chip Multiprocessor Architecture: Techniques to Improve Throughput and Latency. 2007, - 154 p.
 15. Lyupa A.A., Morozov D.N., Trapeznikova M.A., et al. “Three-Phase Filtration Modeling by Explicit Methods on Hybrid Computer Systems,” Mat. Model. 26 (4), 33–43 (2014) [Math. Models Comput. Simul. 6 (6), 551–559 (2014)].
 16. Martinenko A. V. , Tedeev A. F. :On the behavior of solutions to the Cauchy problem for a degenerate parabolic equation with inhomogeneous density and a source. Comput. Math. Math. Phys. 48(7), 1145–1160 (2008)
[MathSciNetCrossRefGoogle Scholar](#)
 17. Morozov D.N., Trapeznikova M.A., Chetverushkin B.N., and Churbanova N.G. “Simulation of Filtration Problems on Hybrid Computer Systems,” Mat. Model. 24 (10), 33–39 (2012) [Math. Models Comput.Simul. 5 (3), 208–212 (2013)].
 18. Musaev M.M., Berdanov U.A. The Technology of Parallel Processing on Multicore Processors // International Journal of Signal Processing System. Vol.4, № 3, June 2015, p.252-257.

19. N.E. Shodmonovna, S.R. Toxirovich, I.Sh. Rashid o'g'li “Parallel computational algorithms for solving boundary value problems for two-dimensional equations of parabolic type” // 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT)
20. Nazirova, E. Sh. : Numerical modeling of oil filtration processes in multi-layer porous media with dynamic connection between layers. Descend. Muhammad Al-Khorezmi 4(6), 10–14 (2018)[Google Scholar](#)
21. Ne'matov A. A. , Nazirova E. Sh. , Sadikov R. T. , I. Nabiyeu 2021 One-Dimensional Mathematical Model and a Numerical Solution Accounting Sedimentation of Clay Particles in Process of Oil Filtering in Porous Medium. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-68449-5_35
22. Ne'matov A. A. , Nazirova E. Sh. , Sadikov R. T. 2021 On numerical method for modeling oil filtration problems in piecewise-inhomogeneous porous medium. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1032/1/012018>
23. Ne'matov A., Ismailov Sh.R. “Beqaror yer osti suvlarining filtratsiya masalasini yechishning parallel hisoblash algoritmi” // *Мақола* // Халқаро Илмий Форум 2023 йил 13 январ
24. Nematov, A., Turdiev Takhirovich, T., Ismailov, S., Bakhridinov, A. Parallel Computational Algorithms for Solving Boundary Value Problems for Two-Dimensional Equations of Parabolic Type. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2021
25. Parallel computing. - <http://www.parallel.srcc.msu.su/>
26. Randal E. Bryant, David R. O'Hallaron. Computer Systems: A Programmer's Perspective (2nd Edition). 2011. ISBN-13: 978-0136108047.
27. Ravshanov N. , Nazirova E. 2018 Numerical simulation of filtration processes of strongly polluted oil in a porous medium PONTE International Journal of Sciences and Research 74 107-116 [CrossrefGoogle Scholar](#)
28. Ravshanov, N. , Nazirova, E. Sh. , Pitolin, V. M. : Numerical modelling of the liquid filtering process in a porous environment including the mobile boundary

- of the “oil-water” section. In: Journal of Physics: Conference Series, vol. 1399, p. 022021. IOP Publishing (2019). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/2/022021>
29. Reinders, James. Intel Threading Building Blocks: Outfitting C++ for Multicore Processor Parallelism (Paperback) Sebastopol: O’Reilly Media, 2007.
30. Sadullayeva Sh. A. 2016 Numerical investigation of solutions to a reaction-diffusion system with variable density J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys. 9 90-101 <https://doi.org/10.17516/1997-1397-2016-9-1-90-101> [CrossrefGoogle Scholar](#)
31. Shodmonovna, N.E., Toxirovich, S.R., Rabbimqulovich, N.A., Rashid O'g'li I.S. Visualization of the Results of Computing Experiments for Monitoring and Analysis of Filtration Processes in A Non-General Layer of Oil Fields. International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities, ICISCT 2021
32. Singh, D. , Singh, M. , Hakimjon, Z. : Requirements of MATLAB/Simulink for signals. In: SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, pp. 47–54. Springer, Heidelberg (2019). https://doi.org/10.1007/978-981-13-2239-6_6
33. Taylor S. Intel Integrated Performance Primitives. How to Optimize Software Applications Using Intel IPP. Intel Corporation, 2004, 400 p.
34. Tianhua Zheng, Jiabin Wang and Yuxiang Cai // Parallel Hybrid Particle Swarm Algorithm for Workshop Scheduling Based on Spark // Algorithms 2021, 14, 262. <https://doi.org/10.3390/a14090262>.
35. А.В. Старченко, В. Н. Берцун, Методы параллельных вычислений, Издательство Томского университета, 2013.
36. Абуталиев Ф. Б. [и др.]. Применение численных методов на ЭВМ в гидрогеологии. Ташкент, “Фан”, 1976.
37. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI. Учебное пособие – М., изд. МГУ, 2004 – 71с.126
38. Богачев К. Ю. Основы параллельного программирования. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. С. 344.

39. Борисов В. С., Васильева М. В., Захаров П. Е., Казаков В. А. Разработка пакета SCore для численного моделирования на вычислительных кластерах // Вестник ЦКР РОСНЕДРА: науч.-техн. журнал. 2012. № 2. С. 36-39.
40. Васильева М. В. Numerical modelling flow in porous media on multiprocessor systems // International young scientists conference in mathematical modeling. Liniy, China, 2010.
41. Воеводин В.В. Численные методы, параллельные вычисления и информационные технологии. М.: БИНОМ, 2008.
42. Гергель В.П. Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем. Учебное пособие – Нижний Новгород; Изд-во ННГУ им. Н.И.Лобачевского, 2010 – 421 с.
43. Губайдуллин Д.А., Никифоров А.И., Цапаев А.В. Алгоритмы распараллеливания на сгущающихся сетках в задачах трехфазной фильтрации жидкости // Вычисл. методы и программирование. – 2007. – Т. 8, № 2. – С. 360–366.
44. Захаров П. Е., Григорьев А. В., Васильева М. В. Параллельное программирование на основе библиотек. Издательско-полиграфический комплекс СВФУ, 2011. С. 94.
45. Кипяткова И.С., Ронжин А.Л., Карпов А.А. Автоматическая обработка разговорной русской речи: СПИИРАН – СПб,: ГУАП, 2013, - 314с.
46. Корняков К.В., Мееров И.Б., Сиднев А.А., Сысоев А.В., Шишков А.В. Инструменты параллельного программирования в системах с общей памятью. – Учебное пособие / Под ред. В.П. Гергеля. – Нижний
47. Ланина Э.П. Многоядерность, как способ увеличения производительности вычислительной системы / Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы», 2008. - 50 с
48. Мазуров П.А., Цапаев А.В. Алгоритмы для распараллеливания решения задач двухфазной фильтрации жидкости на сетках со сгущающимися

- участками // Вычисл. методы и программирование. – 2006. – Т. 7, № 2. – С. 115–123.
49. Малышкин В.Э. Основы параллельных вычислений: Учебное пособие. Часть 2. – Новосибирск: ЦИТ СГГА, 2003. – 264 б.
50. Молчанов И. И. “Машинные методы решения прикладных задач дифференциальные уравнения” Киев наукова думка, 1988.
51. Назарова И.А. Параллельные полностью неявные методы численного решения жестких задач для СОДУ // Искусственный интеллект 3’2005. – Донецк, 2005, с.185-193.
52. Немнюгин С.А. Средства программирования для многопроцессорных вычислительных систем. Учеб.пособ. - СПб, 2007, 87с.
53. Неъматов А., Садиков Р., Исмаилов Ш. Бўлакли бир жинсли бўлмаган ғовак муҳитли қатламда суюқликлар стационар фильтрация масаласини сонли моделлаштириш “Муҳаммад ал-Хоразмий авлодлари» илмий-амалий ва ахборот-таҳлилий журнали”. № 4(14), декабрь 2020. – Б. 11-15
54. Никифоров А.И., Садовников Р.В. Параллельные вычисления на гибридной вычислительной системе в задачах двухфазной фильтрации // Выч. мет. программирование, 2018, том 19, выпуск 1, 9–16.
55. Равшанов Н., Неъматов А., Исмаилов Ш. Эффективный численный алгоритм решения задач фильтрации нефти в пористой среде // Проблемы вычислительной и прикладной математики № 5(43) 2022 16-29 Б
56. Рахимов М.Ф. Цифровая фильтрация речевых сигналов на многоядерных процессорах. Вестник ТУИТ, Ташкент, 2017, 3, стр.27-34.
57. Старченко А.В., Есаулов А.О. Параллельные вычисления на многопроцессорных вычислительных системах. – Томск: Изд-во ТГУ, 2009. – 56 с.
58. Таненбаум Э. Архитектура компьютера. 5-е изд. (+CD). — СПб.: Питер, 2007. — 844 с.
59. Трапезникова М.А., Четверушкин Б.Н., Чурбанова Н.Г. Параллельные алгоритмы решения разностных уравнений //Фундаментальные физико-

математические проблемы и моделирование технико-технологических систем, вып.2. — М.: Станкин, 1999.-с. 178-197.

60. Флинн М. Сверхбыстродействующие вычислительные системы. Пер.с англ. – Труды ТИИЭР, 1966, т.54, вып.12.
61. Хьюз К. и Хьюз Т. Параллельное и распределенное программирование с использованием C++. СПб., Питер, 2004. 667с.
62. Четверушкин Б. Н., Гасилов В. А., Поляков С. В. и др. Пакет прикладных программ GIMM для решения задач гидродинамики на многопроцессорных вычислительных системах // Матем. моделирование. 2005. Т. 17, № 6. С. 58-74.
63. Шпаковский Г.И., А.Е.Верхотуров, Н.В.Серикова. Организация работы на вычислительном кластере. Учеб. пособие. – Мн.: БГУ, 2004. -181 с.
64. Эндрюс Г. Р. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования. М.: Издательский дом Вильяме, 2003. С. 512.
65. Эхтер Ш., Робертс Дж. Многоядерное программирование – СПб, Питер, 2010 – 316с.

