

Махмұт Ерланның 8D06105 – Жүйелік инженерия білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін ұсынылған «Мұнайды ығыстыру есептерін сандық модельдеуге арналған гибриді жоғары өнімді алгоритмдер әзірлеу» тақырыбындағы диссертациясына

АНДАТПА

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Кеуекті ортадағы көп фазалы ағынды химиялық компонент тасымалымен бірге дәл математикалық модельдеу мұнай кенорындарын модельдеу, мұнай өндіруді ұлғайту (МӨТА) және өндірілуі тоқтап бара жатқан кенорындарды тұрақты басқару сияқты инженерлік қолданбалар үшін аса маңызды. Бұл процестер массаның және импульстің сақталу заңдарын өрнектейтін негізгі дифференциалдық теңдеулер класымен басқарылады; олардың сандық дәл шығарылуы айдау сценарийлерін жоспарлау, ұңғыма орналастыру және өндіру жобаларын экономикалық бағалау үшін қажет.

Мұндай ағынның өкілі ретіндегі мысал — полимерлік су айдау процесі, онда полимерлі сулы фаза мұнайлы қабатқа айдалып, фазалардың қозғалғыштық қатынасын жақсартып, ығыстырушы фронттың серпілуін кешеуілдетеді. Полимер тасымалымен жүретін екі фазалы ағынды сипаттайтын теңдеулер мұнай фазасы, су фазасы және ерітілген полимер үшін үш қатты байланысқан сызықтық емес дербес туындылы дифференциалдық теңдеу жүйесін құрайды; жүйе Дарси заңымен, Брукс–Кори салыстырмалы өткізгіштік үлгісімен, полимер ерітіндісі тұтқырлығының дәрежелік модификациясымен және Лэнгмюр адсорбция изотермасымен толықтырылған. Айқын сызықтық еместік, өткір ығыстыру фронттары және ерітілген және адсорбцияланған полимер концентрациялары арасындағы адсорбциядан туындайтын сызықтық емес байланыс — бұлардың барлығы дәстүрлі тізбекті шешушілер үшін елеулі сандық қиындықтар тудырады.

Мұнай кенорындарын модельдеуде ақырлы-айырымдар және ақырлы көлемдер әдістерін пайдаланатын IMPES схемасы сияқты сандық әдістер кеңінен қолданылады; алайда олар нақты кенорын ауқымында жоғары ажыратымдылықты полимерлік су айдау есептеріне қолданылғанда өте ұсақ кеңістіктік және уақыттық дискреттеуді қажет етеді, бұл өз кезегінде жоғары есептеу шығындарына әкеледі. Осы шектеулер тиімдірек есептеу тәсілдерін іздестіруге, әсіресе қазіргі гетерогенді есептеу аппаратурасының барлық иерархиясын — таратылған жадты кластерлерді, ортақ жадты көп ядролы процессорларды және GPU үдеткіштерін — толық пайдалана алатын параллель алгоритмдерді әзірлеуге түрткі болды.

Жоғары өнімді есептеу әдістері осы мәселені негізгі физикалық шешушілерді қазіргі заманғы параллель аппараттық қамтуға сандық дұрыстықты сақтай отырып бейнелеу арқылы шешеді. Соңғы жылдары MPI, OpenMP және CUDA технологияларының гибридік үйлесімдері байланысқан көп фазалы ағын есептерінде елеулі жылдамдату әлеуетін көрсетті. Алайда қолданыстағы зерттеулердің көпшілігі жалғыз парадигма

параллелизмімен немесе бір ғана GPU-мен шектеледі; полимерлік су айдау контекстінде үш байланысқан физикалық ядроны кристалл ішіндегі жад тайлингі арқылы бір мезгілде оңтайландыруда, сондай-ақ үш тәуелсіз параллелизм деңгейін біртұтас есептеу конвейерінде үйлесімді біріктіруде елеулі ғылыми олқылық сақталып отыр. Бұл диссертацияда қазіргі гетерогенді аппараттық қамтудың барлық ауқымында байланысқан полимерлік су айдау жүйесін шеше алатын жеті параллель алгоритмнен тұратын біртұтас иерархия ұсынылып, мұнай өндіруді ұлғайту процестерін жоғары өнімді модельдеуге жаңа серпін беріледі.

Диссертацияның мақсаты

Жұмыстың мақсаты — жоғары өнімді есептеу технологияларын пайдалана отырып, мұнай кенорындарындағы мұнай ығыстыру есептерін шешуге арналған гибриді есептеу алгоритмдерін әзірлеу әрі олардың тиімділігін валидталған тізбекті базалық нұсқамен салыстырғанда жылдамдату, масштабталу және сандық дәлдік тұрғысынан жүйелі түрде салыстыру.

Зерттеу міндеттері:

- бір өлшемді полимерлік су айдау есебі үшін тізбекті сандық алгоритмді әзірлеу және оны валидациядан кейін өнімділіктің базалық нұсқасы ретінде орнықтыру;
- CPU негізіндегі параллель алгоритмдерді — OpenMP ортақ жадпен, MPI таратылған жадпен және MPI+OpenMP гибриді — көп ядролы жүйелерде іске асыру және алты есеп өлшемінде бағалау;
- CUDA глобалды жад GPU алгоритмін іске асыру, оны жаңа CUDA ортақ жад GPU конвейеріне дамыту және іске асыруды MPI+CUDA көп-GPU конфигурациясына кеңейту;
- MPI+OpenMP+CUDA үш деңгейлі гибридік алгоритмін әзірлеу және әрбір іске асыруды Intel VTune, mpiP, NVIDIA Nsight Compute және NVIDIA Nsight Systems құралдары арқылы тізбекті базалық нұсқаға қатысты бағалау.

Зерттеу әдістері: зерттеу әдістеріне әдебиеттерге шолу, математикалық модельдеу, ақырлы-айырымдық дискреттеу, Курант шарты бойынша адаптивті уақыт қадамымен IMPES схемасы, OpenMP, MPI және CUDA бағдарламалау модельдері арқылы параллель алгоритмдерді жобалау және іске асыру, $N = 65\,536$ -дан $N = 67\,108\,864$ ұяшыққа дейінгі алты тор өлшемінде сандық эксперименттер жүргізу, сондай-ақ нәтижелердің дәлдігін Бакли–Леверетт аналитикалық шешімімен салыстыру, машиналық дәлдік деңгейінде масса сақталуын тексеру және Intel VTune, mpiP, NVIDIA Nsight Compute, NVIDIA Nsight Systems профильдеу құралдарының деректерімен растау арқылы бағалау және валидациялау кіреді.

Зерттеу нысаны

Бір өлшемді кеуекті ортада ерітілген полимер тасымалымен жүретін екі фазалы (су–мұнай) ағын және оны сипаттайтын үш байланысқан дербес туындылы дифференциалдық теңдеулер жүйесі.

Зерттеу пәні

Гетерогенді CPU–GPU есептеу платформаларында OpenMP, MPI, CUDA және олардың гибридік үйлесімдерін пайдалана отырып, полимерлік су айдаудағы байланысқан қысым, қанығу және полимер концентрациясы өрістерін жоғары өнімді параллель шешу әдістері.

Нәтижелердің ғылыми жаңалығы:

– Ортақ жад тайлинг стратегиясын пайдалана отырып, қысым, қанығу және полимер концентрациясы үшін толық байланысқан GPU негізіндегі сандық алгоритм әзірленді; онда варп деңгейіндегі shuffle редукциясы ағындар арасындағы синхрондау шығындарын жояды, ал SM-резидент тайлдар жаһандық жадқа қатынау кідірісін амортизациялайды — бұл бірлесе көп фазалы кеуекті ортадағы модельдеудің есептеу тиімділігін арттырады.

– Ауқымды мұнай ығыстыру есептерін модельдеу үшін масштабталатын MPI–OpenMP–CUDA үш деңгейлі гибридік параллель алгоритмі әзірленді; ол едәуір үлкен есептеу торларында тиімді таратылған көп-GPU есептеулерін жүргізуге мүмкіндік береді.

Қорғауға ұсынылатын тұжырымдар:

– Ортақ жад тайлинг және варп деңгейіндегі параллелизм негізінде қысым, қанығу және полимер концентрациясы шешушілерінің толық байланысқан GPU іске асырылуы 20,2× жылдамдатуға дейін қол жеткізеді әрі FP64 шындық есептеу өнімділігіне жақын мәнге шығады.

– Әзірленген MPI+OpenMP+CUDA үш деңгейлі гибридік параллель алгоритмі жоғары масштабталу қабілетін көрсетеді әрі оңтайландырылған тізбекті іске асыруға қатысты ауқымды мұнай ығыстыру есептерін модельдеуде 34,7×-ке дейін жылдамдату қамтамасыз етеді.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы

Теориялық маңыздылығы: зерттеу байланысқан көп фазалы ағын есептері үшін параллель алгоритмдерді жобалаудың теориялық негіздерін дамытуға үлес қосады әрі кеуекті ортада тасымалдау процестерін модельдеуде толық конвейерлік ортақ жад тайлинг мен үш деңгейлі гибридік параллелизмнің әдіснамалық мүмкіндіктерін кеңейтеді.

Практикалық маңыздылығы: әзірленген алгоритмдер жоғары ажыратымдылықтағы полимерлік су айдау симуляцияларының есептеу шығындарын азайтады әрі жұмыс станциясы деңгейіндегі қолжетімді аппараттық қамтуда мұнай кенорындарын модельдеу бағдарламалық қамтамасыз ету тиімділігін арттырады, бұл мұнай өндіруді ұлғайту саласындағы инженерлік шешімдерді уақытында қабылдауға септігін тигізеді.

Ғылыми нәтижелердің сенімділігі

Нәтижелердің сенімділігі Бакли–Леверетт аналитикалық шешімімен салыстыру, қысым, қанығу және полимер концентрациясы өрістері бойынша тізбекті базалық нұсқамен

10⁻⁶-дан төмен салыстырмалы қателікпен валидациялау, машиналық дәлдік деңгейінде массаның сақталуын тексеру, негізгі физикалық заңдылықтарға сәйкестік, сондай-ақ Intel VTune, mpiP, NVIDIA Nsight Compute және NVIDIA Nsight Systems профильдеу құралдарының деректерімен өнімділікті өлшеудің тәуелсіз расталуымен қамтамасыз етіледі.

Зерттеу бағдарламаларымен байланысы

Диссертациялық жұмыс «Белгісіздік жағдайында кеуекті ортадағы көп фазалы сұйықтық ағынын жоғары өнімді компьютерлік модельдеу» атты ғылыми-зерттеу жобасы аясында орындалды (мемлекеттік тіркеу нөмірі AP09260564, грант қаржыландыруы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 2021–2023 жж.).

Диссертацияның көлемі мен құрылымы

Диссертация кіріспеден, сегіз негізгі тараудан, қорытындыдан және пайдаланылған дереккөздер тізімінен тұрады.

Бірінші тарауда зерттеудің мотивациясы, мәселенің қойылуы, мақсат пен міндеттер, ғылыми жаңалық, қорғауға ұсынылатын тұжырымдар, жұмыстың шеңбері мен шектеулері, сондай-ақ тәжірибелік платформа баяндалған. Екінші тарауда төрт бағыт бойынша әдебиеттерге шолу жасалған — МӨТА технологиясы ретіндегі полимерлік су айдау, кеуекті ортадағы көп фазалы ағынды математикалық модельдеу, мұнай кенорындарын модельдеудің сандық әдістері және мұнай кенорындарын модельдеуге қолданылатын жоғары өнімді есептеу тәсілдері — және диссертацияда жабылатын үш әдебиет олқылығы анықталған. Үшінші тарауда математикалық модель: үш анықтаушы дербес туындылы дифференциалдық теңдеу, анықтаушы қатынастар және бір өлшемді шекаралық шарттардың тұжырымдары келтірілген.

Төртінші тарауда ақырлы-айырымдық дискреттеу, Курант шарты бойынша адаптивті уақыт қадамымен IMPES схемасы және тізбекті симулятордың төрт ішкі алгоритмі әзірленген. Бесінші тарауда үш CPU-параллель алгоритмі (OpenMP, MPI және MPI+OpenMP гибриді) барлық алты тор өлшемінде толық өнімділік бағасымен ұсынылған. Алтыншы тарауда CUDA глобалды жад және CUDA ортақ жад алгоритмдері, оның ішінде диссертацияның бірінші ғылыми жаңалығы әзірленген. Жетінші тарауда екі көп-GPU гибриді (MPI+CUDA және MPI+OpenMP+CUDA үш деңгейлі гибрид), оның ішінде диссертацияның екінші ғылыми жаңалығы келтірілген. Сегізінші тарауда жеті алгоритмнің біртұтас бағалауы мен валидациясы Intel VTune, mpiP, NVIDIA Nsight Compute және NVIDIA Nsight Systems профильдеу құралдарының деректерімен бірге ұсынылған.

Зерттеу нәтижелері бойынша жарияланымдар

Диссертация тақырыбы бойынша барлығы 10 ғылыми еңбек жарияланды, оның ішінде Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған журналдарда 4 мақала, Web of Science және/немесе Scopus базаларында индекстелген рецензияланатын

журналдарда 4 мақала және халықаралық конференциялардың жинақтарында 2 баяндама жарияланды.

Scopus:

1. Yerlan Makhmut, Timur Imankulov, Sergei Gorlatch, Bazargul Matkerim. A CUDA Performance Study of Global- and Shared-Memory Kernels for the Buckley–Leverett Polymer-Flooding Problem // Applied Sciences. – May 2026. – Q1 (79%).
2. Imankulov T., Kenzhebek Y., Bekele S.D., Makhmut E. Enhancing Oil Recovery Predictions by Leveraging Polymer Flooding Simulations and Machine Learning Models on a Large-Scale Synthetic Dataset // Energies. – 2024. – Vol. 17, No. 14, 3397. – Q1 (90%).
3. Daribayev B., Mukhanbet A., Makhmut E., Azatbekuly N., Imankulov T. Quantum–Classical Hybrid Architecture for Solving the Muskat–Leverett Model // IET Quantum Communication. – 2025. – Vol. 6, No. 1, e70022. – Q1 (79%).
4. Makhmut E., Imankulov T., Daribayev B. Parallel Implementation of Muskat–Leverett Equation Using CUDA // Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science. – 2023. – Vol. 119, No. 3. – Q4 (18%).

Халықаралық конференциялар:

1. Makhmut E., Imankulov T., Daribayev B., Akhmed-Zaki D. Development of Hybrid Parallel Computing Models to Solve Polymer Flooding Problem // European Association of Geoscientists & Engineers, ECMOR 2022. – September 2022. – Vol. 2022. – P. 1–14. (Scopus).
2. Imankulov T., Kenzhebek Y., Makhmut E., Akhmed-Zaki D. Using Machine Learning Algorithms to Solve Polymer Flooding Problem // European Conference on the Mathematics of Geological Reservoirs (ECMOR 2022). – 2022. (Scopus).

Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдарда:

1. Махмұт Е., Кенжебек Е.Ғ., Иманкулов Т.С. MPI+OpenMP гибриді параллельді алгоритмін пайдаланып мұнай ығыстыру мәселесін шешу // Абай атындағы ҚазҰПУ Хабаршысы, «Физика-математика ғылымдары» сериясы. – 2023. – №1(81). – 56–65 беттер.
2. Махмұт Е., Иманкулов Т.С., Мәткерім Б. Мұнай ығыстыру мәселесін шешуде гибриді (MPI+CUDA) параллельді бағдарламасын жобалау және құру // Қазақстан Республикасы Ұлттық инженерлік академиясының Хабаршысы. – 2024. – №1(91).
3. Махмұт Е., Иманкулов Т. CUDA-да қысым теңдеуіне арналған редукция алгоритмдерін салыстырмалы талдау // Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies. – 2023. – 1-том, №2.

4. Мустафин М.Б., Махмұт Е. Машиналық оқытуда графикалық процессорларды пайдалану тиімділігіне салыстырмалы талдау // Қазақстан Республикасы Ұлттық инженерлік академиясының Хабаршысы. – 2024. – Желтоқсан.