

Е. МАХМУТ*, Т. С. ИМАНКУЛОВ, Б. МӘТКЕРІМ

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

МҰНАЙ ЫҒЫСТЫРУ МӘСЕЛЕСІН ШЕШУДЕ ГИБРИДТІ (MPI+CUDA) ПАРАЛЛЕЛЬДІ ПРОГРАММАСЫН ЖОБАЛАУ ЖӘНЕ ҚҰРУ

Бұл зерттеуде паралельді есептеу технологиясын қолданып мұнайды ығыстырудың сандық моделі қарастырылды. Жоғары өнімді есептеу әдісі гибриді (MPI + CUDA, 2 GPU) паралельді есептеу стандарттары пайдаланылды. Зерттеудің негізгі мақсаты MPI арқылы үлестірілген деректерді дербес екі GPU де есептеу процесін жүзеге асыру, сондай-ақ, паралельді алгоритмдердің есептеу уақытына және үдеуіне салыстырмалы талдау жасау болып табылады. Гибриді (MPI + CUDA) паралельді есептеу алгоритмдері құрылды және MPI, CUDA және MPI + CUDA гибриді паралельді бағдарламалары жүзеге асырылып нәтижелеріне талдау жасалынды.

Түйін сөздер: EOR, HPC, CUDA, MPI, гибриді паралелдеу.

Кіріспе. Соңғы онжылдықта мұнайдың жаһандық ашылу көлемінің прогрессивті өсуі байқалды. Бұл негізінен технологияның жетістіктерімен тікелей байланысты болады. Мұнай өндіру стратегиялары әдетте бастапқы сарқылу, екінші реттік және үшінші реттік қайталама алу процестерінен тұрады. Бастапқы әдістерді пайдалану нәтижесінде мұнайдың жалпы қорының шамамен 30% - 40% -на дейін ғана ал алды, ал қалған 60% - 70% -ға дейінгі мұнай бастапқы орнында қалып қоятын. Мұнай қабатына суды айдау әдісі қабат қысымын ұстап тұру үшін және мұнайды ығыстыру процесін тиімдірек орындау үшін маңызды әдістердың бірі [1]. Бұл әдіс қарапайым қосалқы әдіс ретінде көптеген қабат түзілімдерінде кеңінен қолданылады. Бұл әдіс арқылы мұнай өндірісінің 40% -60% қамтамасыз етуге болады.

Екі фазалы сұйықтықтардың араласпай ағу механизмі көптеген мақалаларда жарияланған. Бір өлшемді араласпайтын екі фазалы ағынның ерекше жағдайын 1942 жылы Бакли мен Леверетт [2] теориялық тұрғыдан зерттеді. Бакли-Леверетт моделі бір өлшемді немесе квази-бір өлшемді коллектордағы араласпайтын ығысу процесін сипаттайды және бірнеше қабаттарға бөлінеді.

Қазіргі заманда жоғары өнімді есептеу технологиялары (OpenMP, MPI және CUDA) өнеркәсіптің кез-келген салаларында кеңінен қолданылады, әсіресе мұнай өндіру өнеркәсібінде негізгі тенденцияға айналған. Келесі жұмыс [3] авторлары паралелді бағдарламалау есебінің есептеу уақытын ұсынды. Авторлар бұл жұмыстарында паралелді есептеудің үдеуі мен тиімділігіне талдау жасау арқылы мұнай мәселелерін есептеуде жоғары өнімді есептеу технологияларын қолдану арқылы есептеу уақытының еселеп қысқаруына алып келетініне көз жеткізген.

MPI - хабарлама жіберу кітапхана интерфейсінің спецификациясы [4]. 1994 жылы мамыр айында MPI-дың алғашқы нұсқасы жарияланды. MPI хабарламаны жіберуді бағдарламалау әдісі паралельді бағдарламалаудың кең тараған стандарттарының бірі болып табылады. Бұл стандартта әрбір түйіннің өзінің жеке кеңістігі болады және

* E-mail корреспондирующего автора: erlanmahimut@gmail.com

бұл түйіндер арасындағы байланыс синхронды түрде анық жүзеге асырылады. Әрбір процесте бірлескен операцияларды қолдану арқылы деректерді процестің адресілік кеңістігінен басқа процеске жолдайды. Бір хабарлама бір процестен екінші процеске сәтті жіберіліп және қабылдануы үшін Send және Recv операцияларында тегтері (tag) параметрінің мәні бірдей болуы керек. MPI да хабарлама жіберуді және қабылдауды құруға бағытталған бағдарламалар портативті, тиімді және икемді болуы керек. Сондай-ақ, MPI тіл немесе іске асыру емес, ол спецификация болып табылады. MPI операциялары бағдарламалау тілдері (FORTRAN, C және C++) үшін функциялар, ішкі бағдарлама немесе әдістер ретінде көрсетіледі. MPI-дің бірнеше жүзеге асыру жолдары бар. Атап айтар болсақ, OpenMPI [5] және MPICH [6] сияқты ашық дереккөздер және IBM Spectrum MPI [7] және Intel MPI [8], MS MPI сияқты коммерциялық жүзеге асыруларды өз ішіне қамтиды.

CUDA – GPU де жалпы мақсаттағы бағдарламалауға мүмкіндік беретін бағдарламалау стандарты. MPI стандарты сияқты CUDA стандартыда қазіргі таңда параллельді бағдарламалаудың кең тараған стандарттарының бірі болып табылады. Бұл стандарт CPU мен GPU арасында көпірлік рөл атқарады. CPU-ге қарағанда GPU әлдеқайда жоғары парменді орындау мен жадға тез қол жеткізіу мүмкіндігін қамтамасыз етеді. CUDA-ның негізгі құрлымдық компоненттері [9] ядро, блок және ағын болып табылады. Ядро – пайдаланушы анықтайтын функция, ол N түрлі CUDA ағындарымен параллель жұмыс істейді; ағындар CUDA-да параллельді орындаудың негізгі элементтері болып табылады. Блок бір мезгілде орындалатын ағындардан тұрады. Блоктар жіп блоктарының бір өлшемді, екі өлшемді немесе үш өлшемді торына ұйымдастырылған. Тор – бір ядроны орындайтын ағынды блоктардың массиві. Қазыргы таңда CUDA технологиясын мұнай есептеулерінде жиі қолданады. Мысалға, [10] жұмыс авторлары резервуар үшін CUDA технологиясын пайдаланып, үш өлшемді модельдің параллельді алгоритімін ұсынған.

Бұл зерттеуде мұнай ығыстыру мәселесін шешу үшін GTX 1080 i GPU таңдалды.

MPI+CUDA, бұл жоғары өнімді есептеуде MPI және CUDA технологияларының артықшылықтарын көрсету үшін қолданылатын екі параллельді есептеу стандарттарының комбинациясы. Ол арқылы екі түрлі технологиялардың бірігуімен параллельді бағдарламалар құрып оңтайлы өнімділікке қол жеткізді. [11] Жұмыс авторлары өздерінің еңбегінде бірнеше GPU пайдаланып есептеу жүргізген және ол есептеу жылдамдығын дерліктей арттырған. [12] Жұмыс авторлары бір GPU, екі GPU, үш GPU және төрт GPU ден пайдаланып, әр түрлі өлшемдегі тор көздері бойынша есептеу жүргізген, есептеу нәтижесі GPU санының артуына байланысты есептеу өнімділігі көрнекі жоғарлаған.

Бұл жұмыста, мұнай ығыстыру мәселесін шешуде қысымды есептеу үшін MPI, CUDA және MPI+CUDA гибридті технологиясының есептеу уақыты мен өнімділігі талқыланды, сондай-ақ, соңғы нәтижесіне талдау жасалынды.

Есептің қойылымы. Су мен мұнай кеуекті орта қабатында сығылмайтын сұйықтық ретінде қаралады. Қарастырылатын модель екі фазалы (су, мұнай) ағын. Су және мұнай үшін массаны сақтау заңдылығын ескере отырып, мұнай ығыстыру мәселесінің математикалық моделін төмендегідей сипаттаймыз.

$$\text{Су фазасының теңдеуі: } m \frac{\partial S_w}{\partial t} + \text{div}(\vec{v}_w) = 0. \quad (1)$$

$$\text{Мұнай фазасының теңдеуі: } m \frac{\partial S_o}{\partial t} + \text{div}(\vec{v}_o) = 0; \quad (2)$$

$$S_o + S_w = 1, \quad (3)$$

мұндағы m – кеуектілік, S_o and S_w мұнай мен судың қанықтылығы, \vec{v}_w and \vec{v}_o су мен мұнай фазаларының жылдамдығы. Сонымен қатар жылдамдықтар Дарси заңымен өрнектеледі:

$$\vec{v}_i = -k \frac{f_i(S)}{\mu_i} \nabla p; \quad i = o, w, \quad (4)$$

мұндағы k – абсолютті өткізгіштік, μ_i ($i = o, w$) – мұнай мен судың тұтқырлығы, $f_i(S)$ келесі теңдеумен өрнектелетін салыстырмалы фазалы өткізгіштік:

$$f_w(S_w) = S_w^2, \quad f_o(S_o) = (1 - S_o)^2. \quad (5)$$

(1) және (2) теңдеуінен шығатын мұнайды ығыстыру қысым теңдеуі келесідей:

$$\text{div}(\vec{v}_w) + \text{div}(\vec{v}_o) = 0; \quad (6)$$

Бастапқы шарттар: $S|_{t=0} = S_0, P|_{t=0} = P_0$.

Шекаралық шарттар: $S|_{x=0} = S_{inj}, \frac{\partial S}{\partial x}|_{x=1} = 0, P|_{x=0} = P_{inj}, P|_{x=1} = P_{prod}$.

Жоғарыдағы (1) - (5) мұнай ығыстыру мәселесін шешу үшін Бакли-Левевертт моделі [2] қолданылды. Бакли-Левевертт моделінде келесі болжамдар қарастырылды:

- ағын сызықты, горизонтал және тұрақты қалыңдықта;
- ағын тұрақты температураны сақтайды, сығылмайды және Дарси заңына бағынады;
- су мен мұнай араласпайды;
- гравитация және капиллярлық қысым әсерлері шамалы;
- кеуектілік тұрақты деп есептеледі.

Есепті шешудің сандық моделі. Жоғарыда келтірілген (1) - (5) математикалық моделі арқылы сиппаталатын мұнай ығысу есебін сандық түрде шешу үшін Якоби әдісі қолданылды.

$$\text{Қысым теңдеуі (6) үшін: } P_i^{t+1} = \frac{M_{i+\frac{1}{2}} P_{i+1}^t + M_{i-\frac{1}{2}} P_{i-1}^t}{M_{i+\frac{1}{2}} + M_{i-\frac{1}{2}}}; \quad (7)$$

$$\text{Мұнда, } M_{i+\frac{1}{2}} = \frac{M_i + M_{i+1}}{2}, \quad M_{i-\frac{1}{2}} = \frac{M_i + M_{i-1}}{2}, \quad M_i = \left[-k \frac{f_o(S)}{\mu_o} \right] + \left[-k \frac{f_w(S)}{\mu_w} \right];$$

$$\text{Қанықтылық үшін: } S_i^{t+1} = S_i^t + \frac{\Delta t}{m \Delta x^2} \left[K_{i+\frac{1}{2}} (P_{i+1}^t - P_i^t) - K_{i-\frac{1}{2}} (P_i^t - P_{i-1}^t) \right]; \quad (8)$$

$$\text{Мұнда, } K_{i+\frac{1}{2}} = \frac{K_i + K_{i+1}}{2}, \quad K_{i-\frac{1}{2}} = \frac{K_i + K_{i-1}}{2}, \quad K_i = -k \frac{f_w(S)}{\mu_w}.$$

Есепті шешуде гибридті параллелді алгоритімді пайдалану. Қарастырылған мұнай ығыстыру есебі үшін жалпы MPI, CUDA және MPI+CUDA (2GPU) параллелді алгоритімдер келесі төрт кадамнан тұрады.

1. Есептеудің бастапқы және шекаралық шарттарына сәйкес берілген n нүкте деректері әртүрлі деректерды есептеуші ресурсына (CPU немесе GPU) үлестіріледі.

2. Әрбір есептеу ресурсы өзіне үлестірілген жеке деректерімен есептеу жүргізеді.

3. Есептелген деректерді негізгі процессор жинап алады.

4. Деректерге визуализация жасалады және талдау жүргізіледі.

MPI+CUDA (2GPU) технологиясы бойынша гибридті параллелді есептеу алгоритмі өзіндік ерекшеліктерге ие. Екі GPU құрылғысы пайдаланғандықтан есептеуде алдымен деректерді CPU-дан екіге бөліп екі GPU-ға көшірмесі жолданады. Екі CPU және екі GPU арасындағы деректердің алмасуы 1-суретте көрсетілген. Мұнда көріп отырғанымыздай деректер CPU-лар арасында MPI арқылы алмасады.

Мұнай ығыстыру есебінің гибридті параллелді алгоритмінің жалпы процессі 6-суретте сипатталған. Суреттен көргеніміздей есептеу төмендегі қадамдар бойынша жүзеге асырылады.

1-қадам: есептеуге қажетті параметрлер инициализацияланады.

2-қадам: MPI процесі инициализацияланады.

3-қадам: CPU-ларға екі бөлінген деректер үлестіріледі.

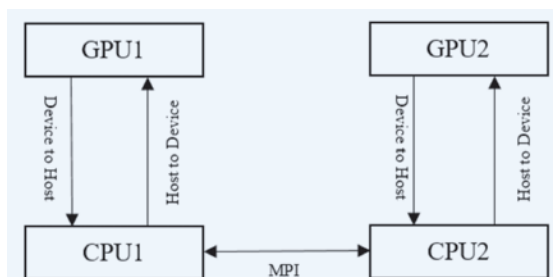
4-қадам: Екі CPU-мен екі GPU құрылғылары 1-суретте көрсетілгендей жұптастырылады.

5-қадам: GPU-да деректер үшін жадтан орын бөлінеді және CPU-дан сәйкес GPU-ға деректер көшіріледі.

6-қадам: Әр GPU-да алгоритм бойынша кезекпен қысым, қанықтылық және концентрация есептелінеді.

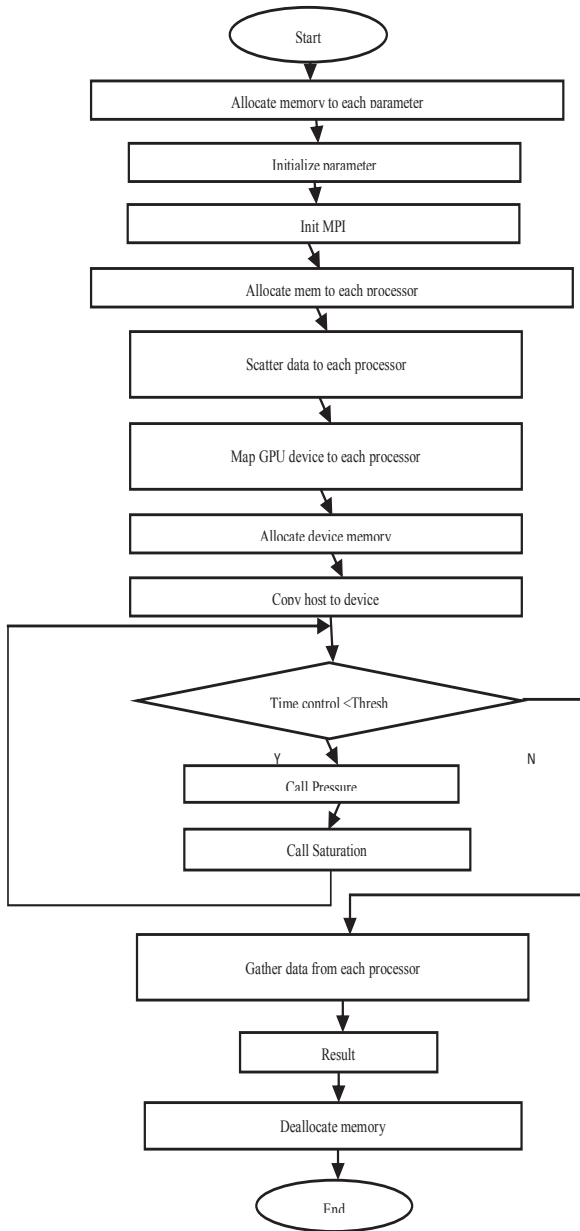
7-қадам: Есептеудің әр итерациясының соңында деректерді параллелді түрде GPU-дан CPU-ға, CPU-дан түбір процессорға жалпы деректерді жинап файлға жазылады.

8-қадам: MPI-процесі аяқталады.

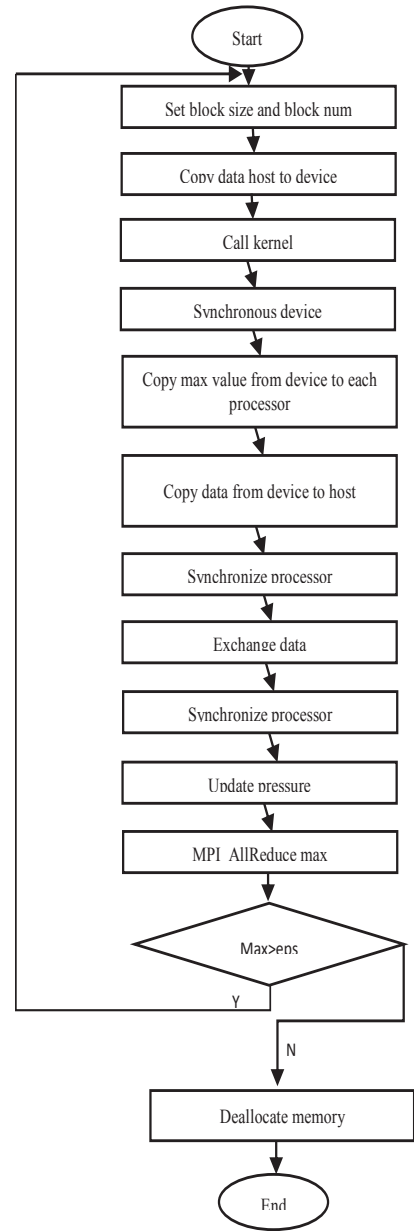


Сурет 1 – GPU лердың арасындағы деректердің алмасу процесі

Гибридті алгоритм бойынша екі GPU-да қысымды есептеудің параллелді алгоритмі 3-суретте сипатталған. Суретте көрсетілгендей қысымды есептеуде әр итерация сайын деректер 2-суреттегідей алмасады және “Call kernel” процессі орындалып отырады. Сонымен қатар \max -тың мәні екі GPU-да есептелген үлкен мәндің глобалды ең үлкен мәні алынады. Анықталған \max мәнін есептеудің дәлдігі ϵ константымен салыстыру нәтижесінде гибридті есептеу арықарай жалғастырылады немесе аяқталады.



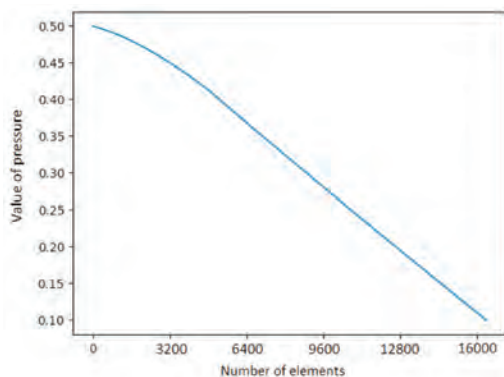
Сурет 2 – MPI+CUDA-да гибритті есептеудің жұмыс ағыны



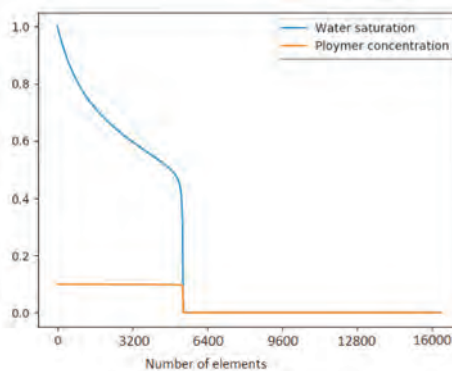
Сурет 3 – Қысымды есептеудің гибритті алгориті

Параллельді есептеу нәтижелері. Жоғарыда қарастырлған мұнай ығыстыру мәселесінің параллелді бағдарламалары жүзеге асырылды және параллелді есептеудің нәитжесі алынды.

4(a)-суретде қарастырылған есептің су қанықтылығы мен полимер концентрациясының таралуы, ал 4(b)- суретінде қысым өзгерісі көрсетілген.



Сурет 4(а) – Полимер және су қанықтылығының таралуы



Сурет 4(б) – Қысымның таралуы

Төмендегі 1-кестеде эксперименттерде қолданылған Бакли-Леверетт моделінің кіріс параметрлері көрсетілген.

Кесте 1 – Модель параметрлері

Параметрлер	Мәні
К (абсолютті өткізгіштік)	0,001
судың тұтқырлығы	0,09
мұнайдың тұтқырлығы	0.3
кеуектілік	0.2
P_{inj}	0,5
P_{init}	0.3
P_{prod}	0.1
S_{inj}	1.0
S_{init}	0,001

Келесі 2-кестеде модельдеудің тізбектей орындау уақытының нәтижелері көрсетілген (қысым үшін). Нүктелер санының көбеюіне байланысты орындау уақыты да артады.

Кесте 2 – Тізбектей орындау уақыты (қысым үшін)

Нүктелер саны	Уақыт
16384 (2^{14})	5.03899
65536 (2^{16})	20.6046
262144 (2^{18})	90.1417
1048576 (2^{20})	397.866
4194304 (2^{22})	2522.03

Келесі 3-кестеде MPI технологиясынан пайдаланып екі процессорда қысымды есептеудің уақыты мен үдеуі көрсетілген.

Кесте 3 – 2 процессорда MPI параллельді орындау уақыты мен үдеуі (қысым үшін)

Нүктелер саны	уақыт	үдеу
2^{14}	7.113	0.71
2^{16}	28.310	0.72
2^{18}	114.696	0.79
2^{20}	468.402	0.85
2^{22}	1945.474	1.3

Келесі 4-кестеде CUDA технологиясынан пайдал бір GPU да қысымды есептеудің уақыты мен үдеуі көрсетілген, ағындар саны 128, 256, 512 және 1024. Нүктелер санының артуына байланысты ағындар саны 256 болған кезде тестілеу нәтижесі жақсара бастады. CUDA стандарты бойынша бір GPU-де алынған параллельді есептеу нәтижесінің үдеуі ең аз болғанда 19.1, ең көп болғанда 24.7-ге жетті, яғни тізбекті есептеуге қарағанда 25 есеге жуық тез есептеді дегенді білдіреді.

Кесте 4 – CUDA параллельді орындау уақыты мен үдеуі (қысым үшін)

	Ағындар саны							
	128		256		512		1024	
Нүктелер саны	уақыт	Үдеу	Уақыт	үдеу	уақыт	үдеу	уақыт	үдеу
2^{14}	1.623	3.1	1.6624	3.0	2.061	2.5	2.882	1.75
2^{16}	2.8093	7.33	2.8203	7.31	2.826	7.31	2.998	6.9
2^{18}	7.5144	12	7.6939	11.7	8.130	11.1	9.186	9.8
2^{20}	25.9973	15.3	26.0143	15.3	28.051	14.2	34.2965	11.6
2^{22}	101.971	24.7	101.916	24.7	108.815	23.2	132.243	19.1

Келесі 5-кестеде CUDA+MPI гибриді параллельді алгоритімнен пайдаланып екі GPU де қысымды есептеудің уақыты мен үдеуі көрсетілген. GPU де ағындар саны 512.

Кесте 5 – CUDA+MPI параллельді орындау уақыты мен үдеуі (қысым үшін)

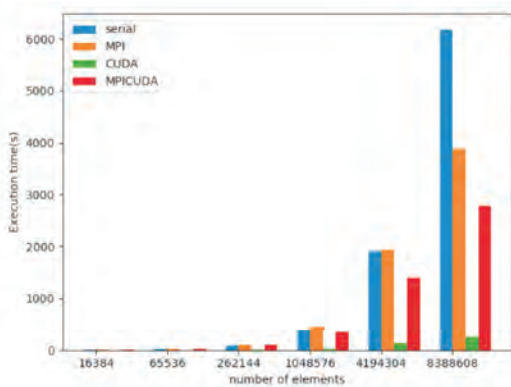
Нүктелер саны	Ағындар (256) / Процессор саны (2)	
	уақыт	үдеу
2^{14}	8.838	0.57
2^{16}	27.436	0.75
2^{18}	102.782	0.88
2^{20}	367.184	1.1
2^{22}	1481.90	1.7

6-кестеде қарастырылған мәселе үшін MPI, CUDA және MPI+CUDA гибридті параллельді алгоритмдерін пайдаланып параллельді бағдарламаларын жүзеге асырудың нәтижелері көрсетілген. Нүктелер санының артуына байланысты, CUDA мен MPI дың гибридті моделі өз рөлін айқын көрсетіп берді. Алайда, берілген нүктелер саны аз болған сайын CUDA мен MPI-дың гибридті моделі CUDA мен салыстырғанда есептеу уақыты салыстырмалы төмен көрсеткішті көрсетті. Мұндағы себеп, біріншіден қысымның әр мезеттегі жаңа мәнін есептеу үшін процессор мен құрылғы арасында өзара деректерді көшіру операциясы орындалады. Екіншіден, есептелген қысымның мәнінің дұрыстығын сақтау үшін алгоритмге сәйкес процессорлар арасында қажет мәндерді алмастыру процесі орындалады. Үшіншіден, әр құрылғыда есептелген Махтың мәнін процессорлардан жинап алу үшін MPI_AllReduce() операциясы орындалады. Деседе, нүктелер санының үздіксіз артуына байланысты екі не одан да көп түйіндер арасына есептеулер жүргізгенде CUDA мен MPI дың гибридті параллельді алгоритмінің есептеу нәтижесі тізбектей есептеу мен MPI-ға қарағанда жақсара түсті.

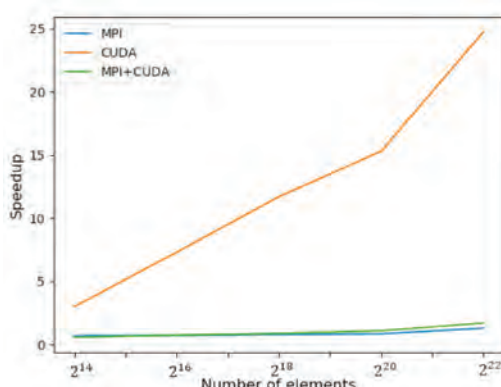
Кесте 6 – Параллель орындау уақытының нәтижелерін салыстыру (қысым үшін)

Нүктелер саны	Тізбектей	MPI (2 processor)		CUDA (256 ағын)		CUDA+MPI (2 processor + 2 GPU)	
	уақыт	уақыт	үдеу	уақыт	үдеу	Уақыт	үдеу
2 ¹⁴	5.03899	7.113	0.71	1.66135	3.0	8.838	0.57
2 ¹⁶	20.6046	28.310	0.72	2.82025	7.31	27.436	0.75
2 ¹⁸	90.1417	114.692	0.79	7.69395	11.7	102.782	0.88
2 ²⁰	397.866	468.402	0.85	26.0143	15.3	367.184	1.1
2 ²²	2522.03	1945.474	1.3	101.916	24.7	1481.90	1.7

5(a) суретте әртүрлі параллельді есептеу модельдерінің орындалу уақытының салыстырылуы көрсетілген. 5(b) суретте әртүрлі параллельді есептеу модельдерінің үдеуінің салыстыру көрсетілген.



Сурет 5(a) – Параллель модельдердің есептеу уақыты



Сурет 5(b) – Параллель модельдің үдеуі

Нүктелердің санының артуына байланысты бастапқы тізбекті үлгінің орындау уақыты басқа параллельді модельдермен салыстырғанда тез өседі және әртүрлі параллельді есептеу модельдерінің үдеуі артады.

Қорытынды. Бұл жұмыста мұнай ығыстру мәселесін шешу үшін параллелді есептеудің MPI+CUDA(2GPU) гибриді технологиясы қарастырылды. Бір өлшемді Бакли-Леверетт математикалық моделі құрылды. Сандық әдістен айқындалған Якоби әдісі таңдалды, сонымен қатар тізбектелген және MPI, CUDA және MPI+CUDA(2GPU) параллелді алгоритмдері құрылды. Параллелді бағдарламалар жүзеге асырылып үш түрлі стандарт бойынша параллелді бағдарламаларға 2^{14} – 2^{22} нүктелер саны бойынша тестілеу жүргізілді. Тестілеу алдымен тізбектелген бағдарлама бойынша әртүрлі нүктелерде есептеудің уақыты алынды. Содан кейін MPI параллелді бағдарламасы орындалып есептеу уақыты алынды. Нәтижесі 3-кестеде көрсетілді. 3-қадамда CUDA параллелді бағдарламасы бір GPU-да және екі GPU-да берілген ағындар санынына сәйкес орындалып есептеу уақытымен үдеуі 4-және 5-кестеде көрсетілді. Тестілеу нәтижесі бойынша CUDA барлық нүктелерде ағындар саны 128, 256, 512 және 1024 болғанда ең жақсы есептеу үдеуін көрсетті. MPI нашар нәтиже берді, себебі салыстырмалы нәтиже алу үшін тек қана екі процессор пайдаланылды. Ал MPI+CUDA(2GPU) орташа нәтиже көрсетті. Нүктелердің санының артуына байланысты, параллелді есептеу алгоритмдерінің үдеуі барған сайын өсті.

Алғыстар. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасының ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (Грант № AP14871644).

ӘДЕБИЕТ

- 1 G. P. Willhite, «Waterflooding,» 1986.
- 2 S. E. Buckley and M. C. Leverett, «Mechanism of Fluid Displacement in Sands, Transact,» 1942.
- 3 T. Imankulov, D. Lebedev, K. Aidarov and O. Turar, «Design of HPC system for analysis the gel-polymer flooding of oil fields,» Contemporary Engineering Sciences, vol. 7, p. 1531–1545, 2014.
- 4 Message Passing Interface Forum, «MPI Forum,» 2017. [Online]. Available: <http://mpi-forum.org/docs/>.
- 5 The Open MPI Organization, «Open MPI: Open Source High Performance Computing,» 2018. [Online]. Available: <https://www.open-mpi.org/>.
- 6 MPICH Organization, «MPICH,» 2018. [Online]. Available: <http://www.mpich.org/>.
- 7 IBM Systems, «IBM Spectrum MPI,» 2018. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/us-en/marketplace/spectrum-mpi>.
- 8 Intel Developer Zone, «Intel MPI Library,» 2018. [Online]. Available: <https://software.intel.com/en-us/intel-mpi-library>.
- 9 Kandrot, E., Sanders, J., 2011. CUDA by Example. Addison-Wesley Professional (ISBN:0131387685 9780131387683)
- 10 Beisembetov, I. K., T. T. Bekibaev, B. K. Assilbekov, U. K. Zhapbasbayev, and B. K. Kenzhaliev. [2012] «High-performance computing in oil recovery simulation based on CUDA.» Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics. Sao-Paulo, Brazil.
- 11 Bayat, M., and J. E. Killough. [2013] «An experimental study of GPU acceleration for reservoir simulation.» SPE Reservoir Simulation Symposium.

12 Jianqi Lai, Hang Yu, Zhengyu Tian, and Hua Li, “Hybrid MPI and CUDA Parallelization for CFD Applications on Multi-GPU HPC Clusters.” Scientific Programming, vol. 2020, p. 15, 2020.

REFERENCES

- 1 G. P. Willhite, “Waterflooding,” 1986.
- 2 S. E. Buckley and M. C. Leverett, “Mechanism of Fluid Displacement in Sands, Transact,” 1942.
- 3 T. Imankulov, D. Lebedev, K. Aidarov and O. Turar, “Design of HPC system for analysis the gel-polymer flooding of oil fields,” Contemporary Engineering Sciences, vol. 7, p. 1531–1545, 2014.
- 4 Message Passing Interface Forum, “MPI Forum,” 2017. [Online]. Available: <http://mpi-forum.org/docs/>.
- 5 The Open MPI Organization, “Open MPI: Open Source High Performance Computing,” 2018. [Online]. Available: <https://www.open-mpi.org/>.
- 6 MPICH Organization, “MPICH,” 2018. [Online]. Available: <http://www.mpich.org/>.
- 7 IBM Systems, “IBM Spectrum MPI,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/us-en/marketplace/spectrum-mpi>.
- 8 Intel Developer Zone, “Intel MPI Library,” 2018. [Online]. Available: <https://software.intel.com/en-us/intel-mpi-library>.
- 9 Kandrot, E., Sanders, J., 2011. CUDA by Example. Addison-Wesley Professional (ISBN:0131387685 9780131387683)
- 10 Beisembetov, I. K., T. T. Bekibaev, B. K. Assilbekov, U. K. Zhapbasbayev, and B. K. Kenzhaliev. [2012] “High-performance computing in oil recovery simulation based on CUDA.” Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics. Sao-Paulo, Brazil.
- 11 Bayat, M., and J. E. Killough. [2013] “An experimental study of GPU acceleration for reservoir simulation.” SPE Reservoir Simulation Symposium.
- 12 Jianqi Lai, Hang Yu, Zhengyu Tian, and Hua Li, “Hybrid MPI and CUDA Parallelization for CFD Applications on Multi-GPU HPC Clusters.” Scientific Programming, vol. 2020, p. 15, 2020.

Е. МАХМУТ, Т. С. ИМАНКУЛОВ, Б. МАТКЕРИМ

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ (MPI+CUDA) ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ

В данном исследовании рассмотрена численная модель вытеснения нефти с использованием технологии параллельных вычислений. Использовались стандарты высокопроизводительных гибридных вычислений (MPI + CUDA, 2 GPU) для параллельных вычислений. Основная цель исследования – реализовать процесс расчета распределенных данных с помощью MPI независимо на двух графических процессорах, а также провести сравнительный анализ времени расчета и ускорения параллельных алгоритмов. Были созданы гибридные (MPI + CUDA) алгоритмы параллельных вычислений и реализованы MPI, CUDA, гибридные параллельные программы MPI и CUDA и проанализированы результаты.

Ключевые слова: EOR, HPC, CUDA, MPI, гибридный параллелизм.

E. MAKHMUT, T. S. IMANKULOV, B. MATKERIM

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A HYBRID (MPI+CUDA) PARALLEL PROGRAM FOR SOLVING THE OIL DISPLACEMENT PROBLEM

In this work, a numerical model of oil displacement was developed using parallel computing technology through the Buckley-Leverett method. Used the hybrid (MPI + CUDA (2 GPU)) high-performance parallel computing technologies. The main goal of this work is by using these two GPU to implement computing processes of distributed data through the MPI, as well as to make a comparative analysis of the computing time and acceleration of parallel algorithms. The MPI, CUDA, hybrid (MPI + CUDA) parallel computing algorithm and the parallel program were realized, and the results were analyzed.

Key words: *EOR, HPC, CUDA, MPI, Hybrid parallel.*