

# О РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НЕФТЕДОБЫЧИ

Б. МАТКЕРИМ, Д.Ж. АХМЕД-ЗАКИ  
*Казахский национальный университет имени аль-Фараби*  
e-mail: darhan\_a@mail.ru

An approach to solving the problem using a mathematical model of the filtration process, taking into account the kinetics of heat and mass transfer occurring in the development of oil and gas fields with the use of hybrid technology of parallelize

Нефтегазовыми компаниями и научно-исследовательскими организациями в дальнем и ближнем зарубежье и в Республике Казахстан разрабатываются и внедряются в промышленность новые способы и технологические процессы извлечения и переработки нефти и газа. Например, в настоящее время в мире имеется огромное количество исследований в области теории фильтрации с достаточным набором тех или иных математических моделей и различных подходов их решения, но к сожалению в реальности при разработках месторождений нефти и газа возникают более сложные варианты протекания процессов фильтрации с учетом кинетики тепло-, массообмена и т.д., что естественно на прямую влияет на технологическую схему эксплуатации объекта и требует наличия информационных систем “быстрого” реагирования (расчета) и прогнозирования. Последнее предполагает формирование ИТ систем адекватного компьютерного моделирования и его скорейшего расчета за минимально короткие сроки, что невозможно достигнуть без применения современных пакетов программ [1-2]. Необходимость решения больших задач неизбежно приводит к применению вычислительной техники на пределе их возможностей. В настоящее время в Казахстане вычислительные работы ведутся на персональных компьютерах, ресурсы которых сильно ограничены. В научно-исследовательских центрах при крупных производственных компаниях развитых стран дальнего зарубежья и России современные исследования базируются на высокопроизводительных компьютерах, производительность которых позволяет значительно сократить вычислительные и организационные издержки.

Различными научно-исследовательскими организациями и производственными компаниями в мире ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы создания вычислительных и управляющих систем для нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, в частности, созданы программные продукты компаний Roxar, Шлюмберге, Тайгерз и т.д. Однако, они решают частные задачи и имеют ряд существенных особенностей и ограничений: ввод и обработка огромного объема входных данных (иногда даже искаженных), а также эффективная визуализация без возможности реальной оценки происходящих процессов внутри нефтегазонасыщенных пластов и т.п. Успешная разработка месторождения нефти и газа зависит от своевременного применения различных методов повышения нефтеотдачи пластов. При разработке месторождений возникает необходимость выполнения оценки процесса разработки, которая связана с извлечением нефти путем использования современных методов

воздействия на пласт. Проводимые исследования и созданные программные средства иностранных компаний требуют значительных затрат по внедрению и адаптации этих систем для условий наших месторождений. Но в тоже время методы описания процессов и технологии решения указанных задач не разглашаются, что не оказывает положительного влияния на развитие отечественной науки в данной отрасли.

При этом для разработки эффективных систем мониторинга, контроля и управления разработкой нефтегазового месторождения, прежде всего необходимы [3]:

1. Формирование единого подхода в оценке инвестиционной отдачи от реализаций сложных технологических систем, а также стратегии (плана) поэтапного вовлечения крупных месторождений в эксплуатацию.
2. Проведение предварительных работ по сбору первичных данных и определению способа разработки/эксплуатации объекта. Построение адекватной модели (физическая, математическая/компьютерная) рассматриваемой технологической системы/объекта, для первичной оценки эффективности предлагаемых технологий разработки объектов и анализа возможных сценариев реализации проекта.
3. Создание автоматизированного комплекса по сбору и обработке данных с объектов, постоянное уточнение/корректировка параметров и условий реализованной модели (физическая, математическая/компьютерная). Реализация современных способов передачи и обработки данных с объекта.
4. Определение критериев “оптимального” режима работы и обслуживания объектов, минимизация роли “человеческого фактора”.
5. Разработка систем мониторинга и “быстрого” оповещения о внештатных (аварийных) ситуациях в работе объекта.
6. Создание системы анализа показателей/параметров текущей эксплуатации/разработки объектов, прогнозирования возможных сценариев протекания процессов (физических, химических и т.д.) и экспертных систем для принятия своевременных решений.

Естественно, для реализации каждой из этих задач дополнительно требуется их более детальный и всесторонний анализ с выявлением всех составляющих компонент эффективной работы / эксплуатации / разработки подобных сложных систем.

Учитывая вышеуказанную необходимость обычно, в первую очередь, осуществляется организация соответствующей инфраструктуры вычислительного кластера. После все работы направлены на создание эффективных алгоритмов распараллеливания для решения сложных производственных задач для систем анализа, контроля и оптимизации реализованных на практике техник и технологий производства определенной продукции. Необходимо учесть, что прямые натурные испытания разработок могут потребовать такой величины затрат, которая может превзойти затраты на сами разработки, при этом положительный исход этих испытаний может оставаться под большим риском. Наличие же высокопроизводительной вычислительной системы позволит создать виртуальную модель реальной ситуации, которая позволит просчитать все факторы успешного применения разработок. В настоящее время высокопроизводительные

вычислительные системы становятся безальтернативным средством внедрения информационных технологий в промышленную практику. В связи с этим начали развиваться теоретические исследования технологий построения алгоритмов распараллеливания решения ресурсоемких задач гидродинамики и фильтрации для вычислений на суперкомпьютерах. Исследованиям путем построения алгоритмов и их анализа посвящены работы Яненко Н.Н. [4], Вшивкова В.А., Тарнавского Г. А. [5] и других.

Анализируя опыт существующих исследований проведем анализ построения эффективных вычислительных алгоритмов распараллеливания задач фильтрации, в частности с учетом тепло и массообменных процессов. Обычно под массообменными процессами понимается изменение агрегатного состояния рассматриваемого объекта. Основными моментами являются приведение задач неравновесной фильтрации к задачам со свободными (неизвестными) границами типа Стефана [3] и Веригина [2]. Последний факт оправдан тем, что, имея информации по скважинам восстановить границы рассматриваемой области. Известно, что граница или часть границы могут меняться либо из-за градиента температуры, либо из-за градиента давления. Рассмотрим задачу неравновесной фильтрации в следующей постановке, т.е. задана конечная область  $\Omega$  с кусочно - гладкой границей  $\Gamma \equiv \partial\Omega$ . В соответствии с различными видами граничных условий граница  $\Gamma$  может разбиваться на несколько связных компонент  $\Gamma^i$ . Пусть  $Q_T = \Omega \times [0, T]$ ,  $S_T^i = \Gamma^i \times [0, T]$ ,  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль к границе  $\Gamma$ . Тогда соответствующая система уравнений имеет вид:

$$\mathbf{u}_i = -\frac{K_0 f_i}{\mu_i} \nabla p \quad (i = 1, 2), \quad mH \frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div}(H \mathbf{u}_1) = 0, \quad -mH \frac{\partial s}{\partial t} + \operatorname{div}(H \mathbf{u}_2) = 0, \quad s + s_1 = 1,$$

$$mH \frac{\partial}{\partial t} [c_1 s + (1 - s) c_2] + H \frac{\partial a}{\partial t} + \operatorname{div}(H c_1 \mathbf{u}_1) + \operatorname{div}(H c_2 \mathbf{u}_2) = r, \quad (1)$$

$$H \frac{\partial((1-m)\rho_0 C_0 T_p)}{\partial t} + H \frac{\partial(m(\rho_1 C_1 s \tilde{c}_1 + \rho_2 C_2 s_1 \tilde{c}_2)T)}{\partial t} + \operatorname{div}(H(\rho_1 C_1 v_1 \tilde{c}_1 + \rho_2 C_2 v_2 \tilde{c}_2) \cdot T) + H(\rho_1 C_1 v_1 \varepsilon_1 + \rho_2 C_2 v_2 \varepsilon_2) \cdot \nabla(p) = \operatorname{div}(H(\bar{\lambda}(s, T, \tilde{c}_1, \tilde{c}_2) \nabla T + \bar{\lambda}_0(T_p) \nabla T_p)) - 2\sqrt{\frac{\lambda_3 C_3}{\pi \cdot t}} \rho_3 (T_p + t \frac{\partial T_p}{\partial t})$$

с уравнениями кинетики тепло и массообмена в пористой среде соответственно:

$$\alpha_T \frac{\partial T_p}{\partial t} = \eta(T) - T_p, \quad \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \cdot (G(c) - a), \quad (2)$$

где функции  $\eta(T) \equiv T$  и  $G(c)$  определены в виде, полагая  $c_1 = c$  и  $c_2 = \varphi(c)$ :

$$G(c) = \begin{cases} 1, & c > c^* \\ [0, 1], & c = c^* \\ 0, & c < c^* \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, требуется найти функций  $\{s, p, V, c, a, T\}$  (водонасыщенность, давление, скорость течения, концентрация активной примеси, функция адсорбции, температуры), определенные в  $Q_T$ , удовлетворяющие (1)-(3), начальным и граничным условиям:

$$s|_{t=0} = s_0(x), \quad c|_{t=0} = c_0(x), \quad a|_{t=0} = a_0(x), \quad T|_{t=0} = T_0(x), \quad (4)$$

$$(P, S, \theta) = (P_0, S_0, \theta_0), \quad -D \cdot \frac{\partial c}{\partial n} + \mathbf{v}_{1n} \cdot c = q_n \cdot c^*, \quad (x, t) \in \sum_1 = \Gamma^1 \times [0, \bar{t}], \quad (5)$$

где  $q_n$  – заданный расход на единицу площади,  $c^*$  – известное значение концентрации примеси. Общий алгоритм нахождения параметров задачи имеет вид

$$\begin{aligned} p_{ij}^{k+1} &= p_{ij}^k + \tau_{it} L_h^p (s_{ij}^n, p_{ij}^{k+1}, v_{ij}^n, T_{ij}^n, c_{ij}^n), \\ T_{ij}^{n+1} &= T_{ij}^n + \tau_t L_h^T (T_{ij}^{n+1}, p_{ij}^*, v_{ij}^{n+1}, s_{ij}^n, c_{ij}^n), \\ c_{ij}^{n+1} &= c_{ij}^n + \tau_t L_h^c (T_{ij}^{n+1}, c_{ij}^{n+1}, p_{ij}^*, v_{ij}^{n+1}, s_{ij}^n), \\ s_{1ij}^{n+1} &= s_{1ij}^n + \tau_t L_h^s (s_{ij}^n, p_{ij}^*, v_{ij}^{n+1}, T_{ij}^{n+1}, c_{ij}^{n+1}), \quad s_{2ij}^{n+1} = 1 - s_{1ij}^{n+1}, \end{aligned} \quad (6)$$

которая решается неявным итерационным методом. Устойчивость и соответственно сходимость разностной схемы проверялось путем сравнения с тестовыми данными решений при заданной суммарной скорости. Модифицируем вычислительный алгоритм вводя элементы распараллеливания. Анализ построенных численных алгоритмов математических моделей фильтрации позволяет выделить в них общие подходы и свойства, т.е. в использовании метода скалярной прогонки и общего итерационного цикла, а также большая разреженность матриц системы линейных алгебраических уравнений и простота шаблона разностной схемы полученных при аппроксимации исходных дифференциальных уравнений с возможностью их расщепления на отдельные этапы физических процессов и дискретизации области решения задач. Известно, что указанные свойства наиболее часто учитываются при построении эффективных алгоритмов распараллеливания [5]. Учет свойств конкретной задачи, конкретной системы линейных алгебраических уравнений позволяет найти наилучший вариант распараллеливания алгоритма. В связи с этим при количестве процессоров –  $p$ , предлагается распараллеливание алгоритма в следующей цепочке:

- а) параллелизация на уровне расщепления на отдельные этапы физических процессов в общем итерационном цикле для систем уравнений (6);
- б) параллелизация на уровне дискретизации области решения задач.

Естественно, что данный подход обеспечит максимальную эффективность при правильном распределении/пересылки пакетов данных между процессорами и рациональном использовании ресурсов памяти.

Реализации первого уровня позволит производить расчет систем уравнений (6) отдельно по процессам распределения поля давления, температуры, концентрации и нефтенасыщенности при переходах между временными слоями. Реализации второго уровня позволит существенно увеличить количество расчетных точек, что повысит точность решений задач. При разработке программы использована гибридная технология Open MP и MPI, представляющая собой объединение всех трех уровней. Общая схема организации параллельных вычислений Open MP/MPI представлена на рисунке 1 [6].

Основная идея подхода состоит в глобальном распределении данных по узлам процессоров используя MPI и применении Open MP внутри них. Рассмотрим теперь вопрос об эффективности изложенного подхода. Для этого напомним, что каждый параллельный алгоритм оценивается по двум параметрам: ускорению  $S_p$  и эффективности  $E_p$ , которые определяются по формулам:

$$S_p = \frac{t_1}{t_p}, \quad E = \frac{S_p}{p} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где  $t_1$  – время решения исходной задачи на одном процессоре,  $t_p$  – время решения исходной задачи по параллельному алгоритму на  $p$  процессорах. Мы не будем прини-

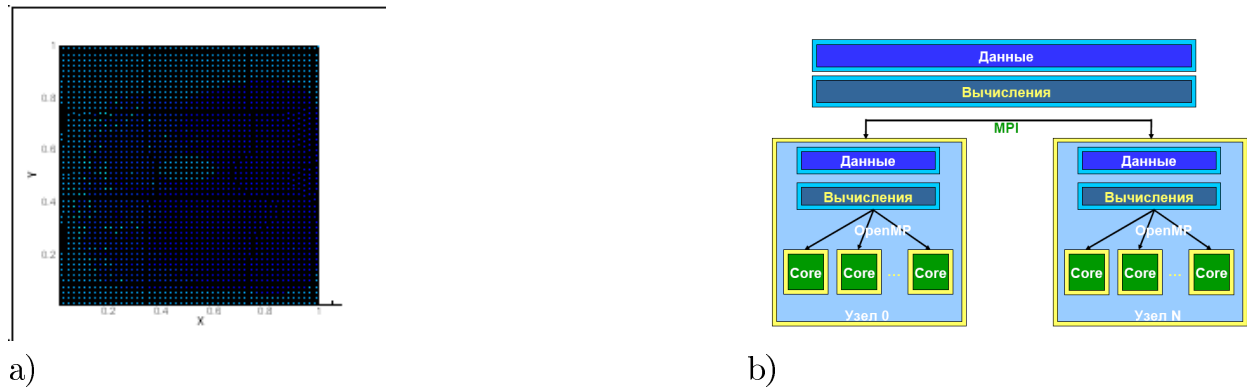


Рис. 1. а – график распределения насыщенности; б – схема организации параллельных вычислений Open MP/MPI

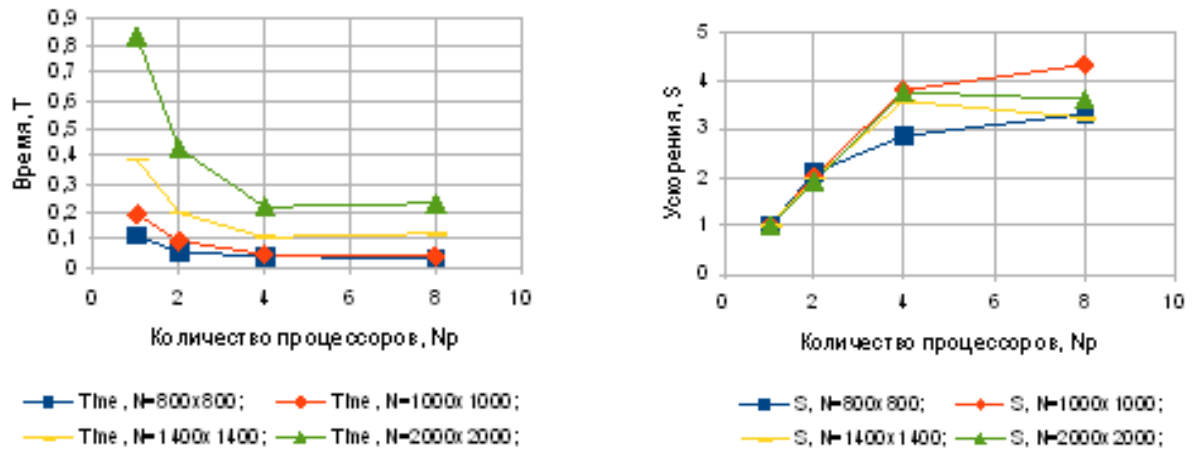


Рис. 2. Распределение времени и ускорения

мать во внимание накладные расходы, связанные со временем обменов, так как последнее является неконтролируемым фактором и сильно зависит от конкретной выбранной схемы вычислений. Результаты практического анализа эффективности расчетов распараллеливания приведены для 800x800, 1000x1000, 1400x1400, 2000x2000 точек на на рисунках 1-3.

Проведенные расчеты показывают, что, несмотря на имеющиеся недостатки, к которым следует отнести, в первую очередь, большое время расчета и традиционное для явного уголка размазывание фронтов концентрации и температуры, предложенная методика применима при исследовании процесса неизотермического вытеснения нефти раствором водорастворимого полимера. Эта же методика пригодна для решения задач вытеснения нефти – водой с закачкой оторочки полимерного раствора на любой стадии разработки. Также легко можно определить технологические показатели (интегральные характеристики процесса): среднюю водонасыщенность, нефтеотдачу, обводненность продукции, долю нефти в добываемой продукции, количество полимера в пласте (в растворе и сорбированного), общее количество за время  $t$  добытой нефти, добытого полимера, закаченной воды и закачанного полимера.

Анализ полученных результатов показывает, что для нашей задачи время расче-

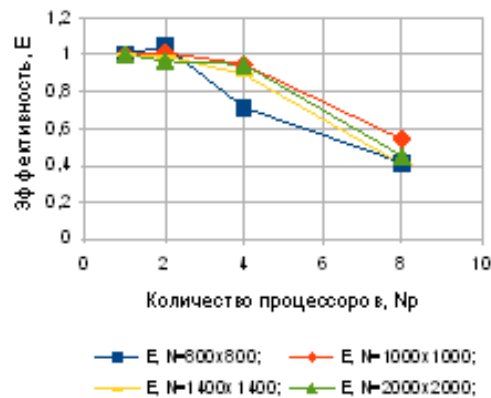


Рис. 3. Распределение эффективности

та быстро стабилизируется уже на 4 процессорах, также ускорение наилучшее для 1000x1000 точек. Эффективность падает очень быстро начиная с 4 процессоров, что связано со стабилизацией времени расчета. Учитывая вышесказанное к основным преимуществам гибридной технологии OpenMP/MPI можно отнести:

- уменьшение степени дублирования данных в памяти узла;
- простота реализации и наличие дополнительного уровня параллелизма в OpenMP, чем на MPI;
- возможность дополнительного ускорения вычислений при решении многоблочных задачах.

Применение технологий организаций параллельных вычислений позволяют значительно сократить время расчета при анализе технологических задач нефтедобычи.

## Список литературы

- [1] САМАРСКИЙ А.А. Математическое моделирование и математической эксперимент // Вестник АН СССР. – 1979. – №5. – С. 57-63.
- [2] ЖУМАГУЛОВ Б.Т., МОНАХОВ В.Н., СМАГУЛОВ Ш.С. Компьютерное моделирование в процессах нефтедобычи. – Алматы: НИЦ “ГЫЛЫМ”, 2002. – 308 с.
- [3] АХМЕД-ЗАКИ Д.Ж., ШЕРКЕШБАЕВА Б.К. Об информационной системе анализа разработки нефтяных месторождений термическими методами // Вестник КазНПУ № 2 (26). – Алматы. – 2009 - с. 20-31.
- [4] ЯНЕНКО Н.Н., КОНОВАЛОВ А.Н., БУГРОВ А.Н., ШУСТОВ Г.В. Об организации параллельных вычислений и “распараллеливании прогонки” // Численные методы механики сплошной среды. – 1978. – № 7. – С. 136-139.
- [5] ВШИВКОВ В.А., ТАРНАВСКИЙ Г.А., НЕУПОКОЕВ Е.В. Параллелизация алгоритмов прогонки: многоцелевые вычислительные эксперименты // Автометрия. – 2002. – Т.4. – С. 11-17.
- [6] БАХТИН В.А. Гибридная модель параллельного программирования DVM/OpenMP // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Москва, 2008. – 122 с.