

СТРУКТУРНО-ПРОЦЕДУРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

*НИИ многопроцессорных вычислительных систем имени академика
А.В. Каляева Южного федерального университета, г. Таганрог*

e-mail: k.a.g@bk.ru

В настоящее время существенная доля нефти извлекается с помощью вторичных методов, таких как вытеснение нефти из пласта водой. Из-за сложной зависимости выхода нефти от интенсивности закачки воды возникает необходимость постоянного моделирования процессов, протекающих в подземных горизонтах. Математически данные процессы описываются дифференциальными уравнениями, составляющими задачу фильтрации жидкости в пористой среде, которая используется в нефтяной промышленности при геофизическом исследовании скважин, а также для моделирования в процессе их эксплуатации.

Одним из уравнений данной задачи является уравнение вида:

$$\nabla(\lambda(p)(\nabla p - \rho_{sc} g \nabla D)) = 0, \quad (1)$$

где $\lambda(p)$ – подвижность (мобильность) нефти, 1/Па·с,
 p – давление, Па,
 ρ_{sc} – плотность нефти при стандартных условиях, кг/м³,
 g – гравитационная постоянная, м/с²,
 $D(x,y,z)$ – вектор заданной глубины, м,
 x, y, z – координаты трехмерного пространства,
 ∇ – оператор Гамильтона.

Высокая вычислительная трудоемкость решения задачи фильтрации жидкости в пористой среде с необходимой точностью требует применения многопроцессорных систем, поскольку производительность однопроцессорных систем не позволяет решать эту задачу за разумное время. Однако традиционные многопроцессорные системы обладают недостаточно высокой эффективностью, особенно при большом числе процессоров, задействованных при решении задач данного класса. В этой связи необходимо изыскивать новые архитектурные решения и методы организации параллельных вычислений для эффективной реализации поставленной задачи. В качестве аппаратной реализации задачи фильтрации жидкости в

пористой среде выбрана модульно-наращиваемая многопроцессорная система (МНМС) на основе реконфигурируемой элементной базы [1].

Для решения уравнения (1) с помощью МНМС был применен метод конечных разностей, относящийся к методам приближенного решения дифференциальных уравнений. Окончательная итерационная формула после процедуры нормализации имеет вид:

$$\begin{aligned}
 p_{i,j,k}^{(n)} = & \frac{\omega}{C_1(\lambda_{i+1,j,k} + \lambda_{i-1,j,k}) + C_2(\lambda_{i,j+1,k} + \lambda_{i,j-1,k}) + C_3(\lambda_{i,j,k+1} + \lambda_{i,j,k-1})} \times \\
 & \times (C_1(\lambda_{i+1,j,k}(p'_{i+1,j,k} - (D_{i+1,j,k} - D_{i,j,k})) + \lambda_{i-1,j,k}(p'_{i-1,j,k} + (D_{i,j,k} - D_{i-1,j,k})))) + \\
 & + C_2(\lambda_{i,j+1,k}(p'_{i,j+1,k} - (D_{i,j+1,k} - D_{i,j,k})) + \lambda_{i,j-1,k}(p'_{i,j-1,k} + (D_{i,j,k} - D_{i,j-1,k})))) + \\
 & + C_3(\lambda_{i,j,k+1}(p'_{i,j,k+1} - (D_{i,j,k+1} - D_{i,j,k})) + \lambda_{i,j,k-1}(p'_{i,j,k-1} + (D_{i,j,k} - D_{i,j,k-1})))) + \\
 & + (1 - \omega)p_{i,j,k}^{(n-1)}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Условием завершения итерационного процесса является выражение:

$$\max_{i,j,k} |p_{i,j,k}^{(n)} - p_{i,j,k}^{(n-1)}| < \varepsilon. \quad (3)$$

Для МНМС характерна структурно-процедурная организация вычислений [2].

На основании выражения (2), применяемого для всех точек заданной области, и выражения (3) была разработана структурная компонента структурно-процедурного алгоритма решения поставленной задачи на МНМС. Вычислительная структура, показанная на рисунке 1, и организация входных и выходных информационных потоков, соответствующих всем узлам сетки, образуют кадр. В данной задаче используются два кадра, которые отличаются только направлением информационных потоков. Процедурная компонента представляет собой порядок смены кадров.

При преобразовании задачи в кадровую форму создается структура данных, которая накладывает ряд ограничений на возможность реализации того или иного варианта распараллеливания задачи. Так, для параллельного поступления всех необходимых данных (согласно (2)) нам потребуется порядка 20 каналов КРП для трех переменных. Чтобы сократить количество каналов КРП, был применены методы минимизации за счет использования буферной памяти. Одним из вариантов реализации буферной памяти является использование элементов задержки на один операнд. Задержка на l операндов может быть реализована путем последовательного соединения l элементов задержки на один операнд. Так, например, чтобы получить значения $p_{i-1,j,k}$ и $p_{i,j-1,k}$ необходимо задержать $p_{i,j,k}$ на один и на M (длина

строки) тактов соответственно, с учетом, что данные поступают в схему с каждым тактом. Таким образом, можно сократить число каналов до трех.

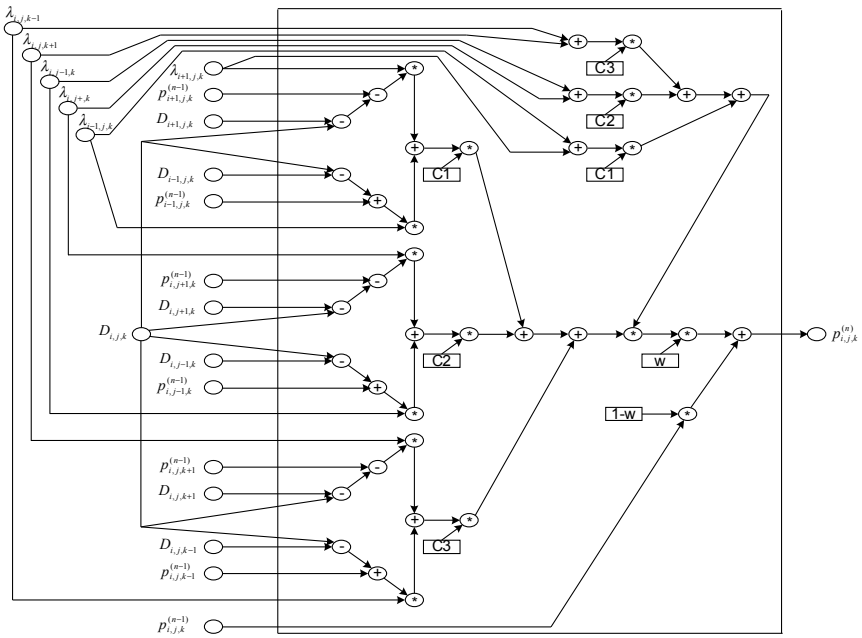


Рисунок 1 – Вычислительная структура задачи фильтрации

Базовый модуль многопроцессорной вычислительной системы со структурно-процедурной организацией вычислений содержит 16 микросхем ПЛИС, связанных по принципу близкодействия [3]. Вычислительная структура задачи фильтрации вместе с элементами задержек отображается на 4 микросхемы базового модуля, образующих, так называемый, квадрант. Распространяя данную структуру на остальные 3 квадранта и разделяя входные потоки на четыре части, мы тем самым распараллеливаем вычислительный процесс, что приводит к сокращению времени решения задачи в четыре раза. Более того, данный вариант отображения позволяет упростить схему за счет получения данных по координате x не из элементов задержки, а из соседних квадрантов (см. рисунок 2). Таким образом, мы имеем пространственно-временное разделение данных по координатам: пространственное – по координате x , временное – по координатам u и z .

Для обмена данными с персональным компьютером, управления ходом вычислительного процесса, выдачи данных на обработку и

записи результатов служит контроллер распределенной памяти (КРП). На каждый квадрант отводится по три КРП: первый и второй (одноканальные) – для чтения массива p в разные моменты времени, третий (двухканальный) – для чтения массивов λ и D . Так, при нечетных итерациях идет чтение первого КРП и запись во второе, а при четных – наоборот. Итерационный процесс заканчивается в случае выполнения условия (3) для всех точек заданной области.

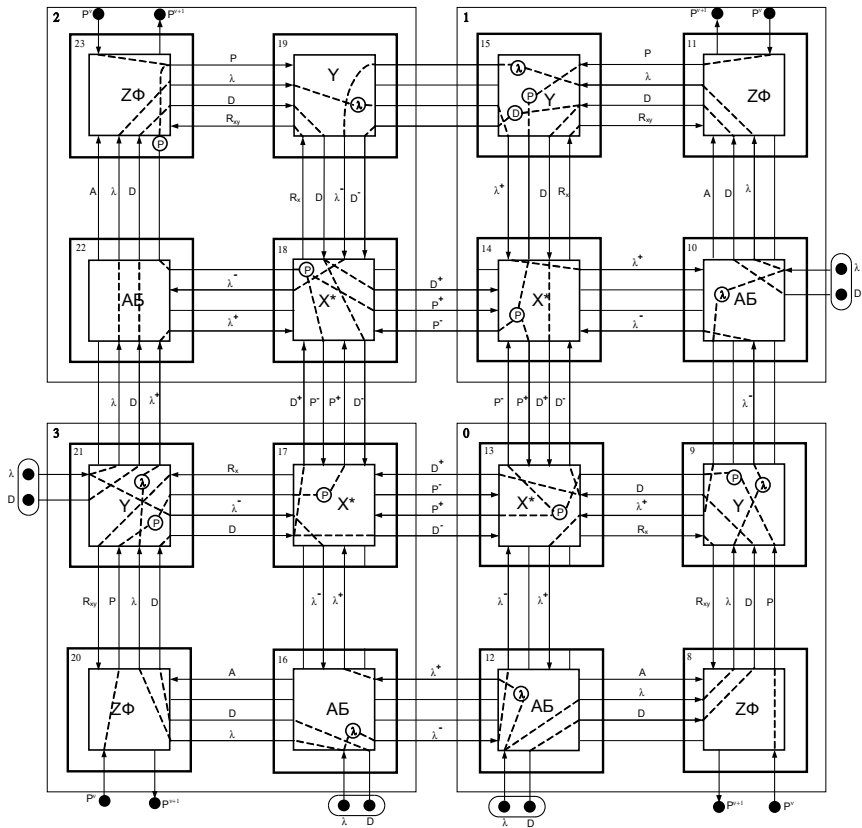


Рисунок 2 – Отображение вычислительной структуры задачи фильтрации на архитектуру базового модуля

Результаты структурно-процедурной реализации задачи фильтрации жидкости в пористой среде представлены в таблице 1. Как видно из данной таблицы, при небольших размерностях области получаемый выигрыш невелик. Однако при увеличении числа узлов

сетки выигрыш заметно увеличивается, что объясняется сокращением влияния времени, затраченного на заполнение конвейера, по сравнению со временем вычислений.

Таблица 1 – Эффективность реализации задачи фильтрации жидкости в пористой среде на МНМС

Размерность задачи (итерационный параметр – 1, заданная точность – 0,01)	Время решения на ПК (Intel Pentium 4 1,8 ГГц, 1,0 ГБ ОЗУ), с	Время решения на БМ, с	Получаемый выигрыш
20x20x20	0,2181	0,0036	60,59
40x40x40	6,1949	0,0773	80,14
80x80x80	294,2225	1,7136	171,70

Таким образом, на МНМС решена задача, позволяющая оптимизировать размещение нефтяных и водонапорных скважин, моделировать различные процессы откачки нефти и закачки воды.

1. Каляев И.А., Левин И.И. Высокопроизводительные модульно-наращиваемые многопроцессорные системы на основе реконфигурируемой элементной базы // Вычислительные методы и программирование. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – Т.8. – №1. – С.181-190.

2. Каляев А.В., Левин И.И. «Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений», Москва «Янус-К», 2003 г.

3. Беседин И.В., Дмитренко Н.Н., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Семейство базовых модулей для построения реконфигурируемых многопроцессорных вычислительных систем со структурно-процедурной организацией вычислений // Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет: технологии параллельного программирования». – М.: Изд-во МГУ, 2006. – С.47-49.