

Неявный трехмерный алгоритм для расчета многофазных многокомпонентных течений в цифровом керне**Научный руководитель – Довгилович Леонид Евгеньевич****Забегаяев Юрий Александрович***Студент (магистр)*

Московский физико-технический институт, Москва, Россия

E-mail: zabegaev99@gmail.com

Рассматривается задача моделирования течения нескольких несмешиваемых жидкостей в трехмерной пористой среде в масштабе пор. Данная задача представляет практический интерес в нефтегазовой промышленности. Лабораторное исследование кернов из месторождения – прямой способ определить физические свойства породы. В данной работе мы занимаемся созданием эффективного алгоритма численного моделирования течения нескольких несмешиваемых жидкостей в цифровых моделях керна. Уравнения движения такого течения (1) определяются с помощью метода функционала плотности в гидродинамике [1-2]. Решение ищется среди гладких функций.

$$\begin{cases} \frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_b} \left(V_b n_i - P_{ij} \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_b} \right) = \vartheta_i^n(t, x_a) \\ \frac{\partial \rho V_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_b} (\rho V_b V_a - \tau_{ab}) + n_i \frac{\partial \Phi_i}{\partial x_a} = \vartheta_a^M(t, x_a) \end{cases} \quad (1)$$

В системе присутствуют производные по пространству до 4-го порядка. В МНИЦ “Шлюмберже” для решения этой системы разработан и применяется алгоритм на основе явной схемы, использующий распределенный кластер с GPU. Использование явной схемы приводит к значительному ограничению шага по времени.

В настоящей работе применяется подход к решению с полностью неявной схемой. Для решения нелинейной системы алгебраических уравнений используется метод Ньютона. При этом требуется вычислять матрицу Якоби и решать образуемую ей линейную систему уравнений.

Расчет проводится на GPU с применением технологии CUDA [3]. Код разностной схемы написан на языке C. С помощью библиотеки SymPy [4] осуществляется автоматическое вычисление производных для конкретной модели жидкости. Из этих формул компилируется код, который вызывается в расчете. Это позволяет легко проводить эксперименты с различными моделями жидкостей без ущерба для производительности.

В результате работы реализованы одномерный и трехмерный симуляторы течения двухфазной двухкомпонентной жидкости. На примере одномерного случая продемонстрированы преимущества применения неявной схемы для данной системы уравнений – наблюдается зависимость максимального шага по времени от скорости процессов в задаче. В трехмерном симуляторе проведены расчеты разных режимов течения: распад смеси (Рис. 1), вытеснение жидкости, формирование и движение капли. Реализован метод решения линейной системы уравнений BiCGStab [6], предобуславливатель Multigrid [7] и различные сглаживатели для него. Работа выполнена в Московском научно-исследовательском центре “Шлюмберже”.

Источники и литература

- 1) Демьянов А.Ю., Динариев О.Ю., Евсеев Н.В. Основы метода функционала плотности в гидродинамике. М., 2009.
- 2) Armstrong R. T. et al. Modeling of pore-scale two-phase phenomena using density functional hydrodynamics // *Transport in Porous Media*. – 2016. – Т. 112. – №. 3. – С. 577-607.
- 3) Cook, S. (2012). *CUDA Programming: A Developer's Guide to Parallel Computing with GPUs* (1st ed.). San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- 4) Meurer A et al. SymPy: symbolic computing in Python // *PeerJ Computer Science* 3:e103.
- 5) Naumov M. et al. AmgX: A library for GPU accelerated algebraic multigrid and preconditioned iterative methods // *SIAM Journal on Scientific Computing*. – 2015. – Т. 37. – №. 5. – С. S602-S626.
- 6) Saad Y. *Iterative methods for sparse linear systems*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2003.q.
- 7) William L Briggs, Van Emden Henson, and Steve F McCormick. *A multigrid tutorial*. SIAM, 2000.

Иллюстрации

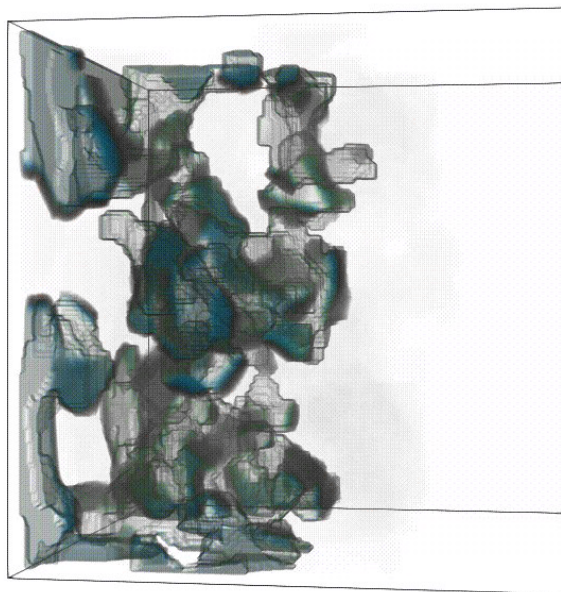


Рис. 1. Моделирование распада смеси