

## Решение задач газовой динамики горения на гибридных вычислительных системах

Л.И. Стамов, Е.В. Михальченко

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»

Задачи горения и детонации являются чрезвычайно интересными и важными для дальнейшего развития современного мира, особенно интересны переходы между этими режимами. Такого рода задача о переходе горения в детонацию является до сих пор наименее изученной, а ее решение, например, может способствовать созданию двигателей нового типа. Сложность изучения такого типа процессов представляет отсутствие возможности решить эти задачи аналитически. В связи с чем часто для моделирования поведения таких систем применяют вычислительный эксперимент.

В данной работе рассмотрена возможность применения ряда схем высокого порядка точности для решения многомерных задач горения и детонации. Рассмотрены численные схемы типа PPM (piece parabolic method) [1] и ряд центральных схем [2-4]. Особенностью методов типа PPM является использование параболы в качестве интерполяционной функций, что позволяет получать более точное представление о поведении пространственных градиентов, а также, лучше описывает разрывы, особенно контактные разрывы. Главной особенностью второго семейства схем является их простота. Выбранные центрированные схемы не требуют каких-либо решателей Римана, которые используются в противопотоковых схемах высокого порядка точности, а также в них нет необходимости вычислять точный якобиан системы уравнений.

Для моделирования протекания химических реакций была выбрана модель нестационарного процесса горения в химически реагирующей однородной газовой среде [5]. В расчетах использовался кинетический механизм горения кислородно-воздушной смеси Мааса и Варнаца [6]. Решение системы химических уравнений осуществлялось с помощью четырех стадийного метода типа Розенброка [7].

Все численные схемы были протестированы с помощью ряда тестовых задач, были сравнены с аналитическими решениями, где это представлялось возможным. Результаты показали хорошее совпадение численных решений с аналитическими в рамках выбранных схем. Однако, стоит отметить, что, например, схема PPM [1] показала меньшее размазывание ударных и контактных поверхностей по сравнению с рассмотренными центральными схемами [2-3]. В то же время, данная схема требует значительно большего числа вычислений, чем центрированные схемы.

В работе для сокращения времени моделирования были построены и рассмотрены параллельные реализации выбранных численных схем. Для их написания использовались технологии OpenMP [8] и CUDA [9]. Распараллеливание производилось на основе геометрической декомпозиции, т.е. расчетная область делилась поровну между имеющимися в системе вычислительными ресурсами. Было рассмотрено влияние размера вычислительной сетки и размеров блоков на производительность. Было получено, что с использованием графических процессоров, в зависимости от их технических характеристик и от количества узлов расчетной сетки, можно получить более чем 10-кратное ускорение по сравнению с центральным процессором. Было показано, что с использованием выбранных технологий параллельного программирования можно значительно ускорить время проведения моделирования задач физико-химической газовой динамики на многопроцессорных системах и системах с графическими сопроцессорами.

### Литература

1. Colella P., Woodward P. R. The Piecewise Parabolic Method (PPM) for Gas-Dynamical Simulations // Journal of Computational Physics. 1984. Vol. 54, pp. 174-201.

2. Jiang G.-S., Tadmor E. Nonoscillatory central schemes for multidimensional hyperbolic conservation laws // *SIAM J. SCI. COMPUT.* 1988. Vol. 19, pp. 1892-1917.
3. Kurganov A., Tadmor E. New High-resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection–diffusion equations // *Journal of Computational Physics.* 2000. Vol. 160, pp. 241-282.
4. Kurganov A., Levy D. A third-order semidiscrete central scheme for conservation laws and convection-diffusion equations // *SIAM J. SCI. COMPUT.* 2000. Vol. 22, No. 2, pp. 1461-1488.
5. Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Алиари Шурехдели Ш. Переходные режимы распространения волн в метастабильных системах // *Физика горения и взрыва.* 2008. 44, 5. с. 25-37.
6. Maas U., Warnatz J. Ignition Processes in Hydrogen-Oxygen Mixtures // *Combustion and Flame.* 1988. Vol. 74, pp. 53-69.
7. Хайпер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. Пер. с англ. М., 1999.
8. Антонов А.С. Технологии параллельного программирования MPI и OpenMP: Учеб. пособие. Предисл.: В.А.Садовничий. М., 2012.
9. NVIDIA CUDA. Programming Guide. 2015. URL: <http://developer.nvidia.com/cuda-downloads> (дата обращения: 27.05.2015).