
ИНФОРМАТИКА

© В.Э. БОРЗЫХ, Б.В. СЕМЕНОВ

borzykh@tsogu.ru, semenov@tsogu.ru

УДК 519.67

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВ ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СТРУКТУРУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ NVIDIA CUDA

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена применению технологии NVIDIA CUDA, техники общих вычислений на графических ускорителях, для численной реализации математической модели процесса фильтрации отработавших выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания.

SUMMARY. The article is devoted to the use of NVIDIA CUDA technology, equipment general computing on graphics accelerators, for numerical realization of mathematical model of the process of filtration of the exhaust of the exhaust gases of the engine of internal combustion.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Графический ускоритель, пористая среда, фильтрация, параллельные вычисления.

KEY WORDS. Graphics accelerators, porous medium, filtering, parallel computing.

Современные исследования в научных и технических областях требуют все больших вычислительных мощностей. Для моделирования различных физических, химических, биологических, экологических и иных процессов разрабатываются сложные программные комплексы, работающие на дорогостоящем оборудовании. Специально для подобных задач строятся кластеры, обладающие производительностью в десятки терафлоп и более.

В настоящее время появилась альтернативная тенденция — использование нескольких параллельно работающих процессоров или их ядер при обработке одной задачи. В частности технология General-purpose computing on graphics processing units (GPU общего назначения) — техника использования графического процессора видеокарты, позволяющая производить неграфические вычисления на видеоадаптерах.

Подобный подход оказался настолько успешен, что даже суперкомпьютеры в наши дни стали оборудоваться видеокартами, способными выполнять вычисления общего характера. В данной работе мы применим описанную технологию для численной реализации математической модели процесса фильтрации от-

работанных выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания, а также рассмотрим, какие параметры модели влияют на производительность и каким образом.

Для реализации данной задачи возьмем систему дифференциальных уравнений, представляющих собой локальные (дифференциальные) уравнения переноса газа в пористой среде [1]. Решая эти уравнения, можно получить полное представление о процессе переноса вещества внутри пористого тела. Рассмотрим систему уравнений для ламинарного течения пятикомпонентной смеси газов:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{j=1}^v \frac{n_j}{\sum_{k=1}^s n_k \cdot D_{1j}} \left(\frac{J_1 - J_j}{n_1 - n_j} \right) + \frac{1}{D_{1K}} \left[\frac{J_1 + B_0}{n_1} \left(\frac{p_1 - p_0}{L} \right) \right] &= \frac{1}{n_1} \frac{\partial n_1}{\partial z} - \frac{\sum_{j=1}^s \frac{\partial n_j}{\partial z}}{\sum_{j=1}^s n_j} - \frac{(p_1 - p_0)}{L} \frac{1}{p_0 + \frac{p_1 - p_0}{L}} \\ \sum_{j=1}^v \frac{n_j}{\sum_{k=1}^s n_k \cdot D_{2j}} \left(\frac{J_2 - J_j}{n_2 - n_j} \right) + \frac{1}{D_{2K}} \left[\frac{J_2 + B_0}{n_2} \left(\frac{p_1 - p_0}{L} \right) \right] &= \frac{1}{n_2} \frac{\partial n_2}{\partial z} - \frac{\sum_{j=1}^s \frac{\partial n_j}{\partial z}}{\sum_{j=1}^s n_j} - \frac{(p_1 - p_0)}{L} \frac{1}{p_0 + \frac{p_1 - p_0}{L}} \\ \sum_{j=1}^v \frac{n_j}{\sum_{k=1}^s n_k \cdot D_{3j}} \left(\frac{J_3 - J_j}{n_3 - n_j} \right) + \frac{1}{D_{3K}} \left[\frac{J_3 + B_0}{n_3} \left(\frac{p_1 - p_0}{L} \right) \right] &= \frac{1}{n_3} \frac{\partial n_3}{\partial z} - \frac{\sum_{j=1}^s \frac{\partial n_j}{\partial z}}{\sum_{j=1}^s n_j} - \frac{(p_1 - p_0)}{L} \frac{1}{p_0 + \frac{p_1 - p_0}{L}} \\ \sum_{j=1}^v \frac{n_j}{\sum_{k=1}^s n_k \cdot D_{4j}} \left(\frac{J_4 - J_j}{n_4 - n_j} \right) + \frac{1}{D_{4K}} \left[\frac{J_4 + B_0}{n_4} \left(\frac{p_1 - p_0}{L} \right) \right] &= \frac{1}{n_4} \frac{\partial n_4}{\partial z} - \frac{\sum_{j=1}^s \frac{\partial n_j}{\partial z}}{\sum_{j=1}^s n_j} - \frac{(p_1 - p_0)}{L} \frac{1}{p_0 + \frac{p_1 - p_0}{L}} \\ \sum_{j=1}^v \frac{n_j}{\sum_{k=1}^s n_k \cdot D_{5j}} \left(\frac{J_5 - J_j}{n_5 - n_j} \right) + \frac{1}{D_{5K}} \left[\frac{J_5 + B_0}{n_5} \left(\frac{p_1 - p_0}{L} \right) \right] &= \frac{1}{n_5} \frac{\partial n_5}{\partial z} - \frac{\sum_{j=1}^s \frac{\partial n_j}{\partial z}}{\sum_{j=1}^s n_j} - \frac{(p_1 - p_0)}{L} \frac{1}{p_0 + \frac{p_1 - p_0}{L}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

На основе поставленной задачи и дополнительных требований к системе определен окончательный набор функций программы:

- 1) управление параметрами:
 - а) задание начальных параметров;
- 2) расчет эксперимента по заданным данным:
 - а) реализация процесса фильтрации отработанных газов двигателя внутреннего сгорания, на основе молекулярно-кинетической теории;
 - б) распараллеливание расчетов с использованием технологии NVIDIA CUDA;
 - в) оптимизация параллельных вычислений;
- 3) вывод результатов эксперимента.

Система разрабатывалась для работы в операционных системах Windows XP/Vista/7. Для написания программы использовался инструментальный разработки программного обеспечения на языке программирования C++ — Microsoft Visual Studio 2010. В качестве GPGPU-фреймворка была выбрана технология

NVIDIA CUDA, поддерживающая спецификации языка C/C++. Функциональность данной технологии обеспечивается набором библиотек и правил построения проекта, позволяя производить вычисления на стороне видеокарты. NVIDIA CUDA расширяет стандарт C99 несколькими ключевыми словами, обеспечивающими доступ к ресурсам GPU. Также, не смотря на то, что CUDA полноценно не поддерживает ООП, встраивание ядер (функций, выполняемых параллельно на GPU) в систему классов не вызывает никаких трудностей.

Четыре параметра вычислительной модели представляют для нас наибольший интерес:

- размер генерируемого сегмента фильтра;
- общее количество обработанных пор;
- количество нитей в блоке;
- длина шага по пространству.

Рассмотрим их влияние на время выполнения компьютерного эксперимента (для чистоты эксперимента использовались две видеокарты GeForce GTX 480 и NVIDIA GeForce 8800 GT). В ходе каждого опыта изменялся только один из параметров, значения остальных будут соответствовать тем, что указаны в эксперименте со схемами организации данных. Только в построении зависимости между быстродействием и размером блока выполнения ядра количество пор в генерируемом сегменте составит 98304. Сделано это для того, чтобы на один блок приходилось целое число пор.

На основе проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Численная реализация процесса прохождения ОГ через СВС-фильтр очень хорошо поддается распараллеливанию. Отношение быстродействия для CUDA-реализации и однопоточного алгоритма составило 250 раз.

2. Более слабую видеокарту модель загружает даже при небольшом количестве нитей в блоке, а насыщение мощного адаптера происходит лишь при значениях, превышающих 128 нитей на блок.

3. Зависимость времени расчета от размера генерируемого сегмента имеет линейный вид. При помощи аппроксимации была получена функция этой зависимости для обоих графических процессоров:

$$t_{8800GT}(n) = -0.003 * n + 8.345 * 10^4, \quad (1)$$

$$t_{GTX480}(n) = -0.001 * n + 3.25 * 10^3. \quad (2)$$

4. Время расчета прямо пропорционально количеству пор в фильтре и соответствует:

$$t_{8800GT}(N) = 0.027 * N - 42.1, \quad (3)$$

$$t_{GTX480}(N) = 6.7 * 10^{-4} * N + 53.3. \quad (4)$$

5. Зависимость быстродействия от шага по пространству для обоих адаптеров имеет экспоненциальный вид и выражается соотношениями:

$$t_{8800GT}(\Delta z) = 1,46 * 10^5 * e^{-1.8 * 10^4 * \Delta z} + 1.05 * 10^4, \quad (5)$$

$$t_{GTX480}(\Delta z) = 3,57 * 10^3 * e^{-1.82 * \Delta z} + 399. \quad (6)$$

При проведении компьютерного эксперимента на описанной вычислительной модели желательно придерживаться следующих рекомендаций:

1. Генерировать большие сегменты блока. Это позволяет поднять производительность за счет уменьшения задержек памяти при пересылке данных с хоста на устройство.

2. Использовать блоки, содержащие 128 или 256 нитей. Именно при этих значениях время расчета минимально при неизменных прочих параметрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзых В.Э., Семенов Б.В. Математическое моделирование процессов течения многокомпонентных газов через пористую структуру // Вестник ТюмГУ. 2009. № 6. С. 192-197.

2. Новый справочник химика и технолога. URL: www.naukaspb.ru.