

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА ГРАФИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ

Б.П. Рыбакин, Е.В. Егорова

В работе представлены параллельные алгоритмы и программы расчетов распространения ударных волн с использованием метода крупных частиц [1]. Применение параллельных алгоритмов позволяет достаточно эффективно исследовать особенности поведения волн большой интенсивности, возникающих при решении различных задач нестационарной газовой динамики. Приведены результаты тестовых расчетов, а также некоторые результаты взаимодействия ударной волны с областью пониженной плотности. Построен параллельный алгоритм для проведения расчетов на многопроцессорных ЭВМ. Кроме того, была использована архитектура CUDA для проведения расчетов на графическом ускорителе GPU.

Введение. Современные задачи математического моделирования в реалистичной постановке требуют увеличения размеров вычислительной области и точности самих расчетов. В связи с этим возникает необходимость переноса существующих и создание новых приложений на современных производительных компьютерах, основанных на многоядерной архитектуре и с применением графических ускорителей. Для переноса программ на такие системы необходимо разрабатывать параллельные варианты существующих численных алгоритмов. При переносе существующих программ на многопроцессорные системы возникает много проблем. Необходимо гарантировать, чтобы результаты обеспечивали точность и сходимость того же порядка, что и результаты, полученные при последовательных расчетах. Особенно актуально это стало с появлением графических ускорителей. Графический ускоритель - это графическая карта, состоящая из: платы, GPU, памяти, каналов передачи данных и т.д. Современные графические карты могут содержать нескольких сотен и даже тысяч ядер, что обеспечивает значительное увеличение производительности. Существуют различные технологии, позволяющие применять при расчетах графический ускоритель. Наиболее известные из них это технологии OpenCL и CUDA. Кроме того, одновременно с GPU нужно использовать традиционные технологии распараллеливания - OpenMP и MPI. В данной статье используем технологию CUDA, разработанную компанией NVIDIA для GPU и технологию OpenMP для обычных компьютеров с общей памятью.

Постановка задачи. Многие современные задачи газовой динамики, представляющие практический интерес, можно описать в двумерной постановке с помощью уравнений Эйлера. Решение таких задач в общем случае требует значительных вычислительных ресурсов. Кроме того, для их решения нужны эффективные схемы высокого порядка точности. Такие схемы должны также хорошо распараллеливаться для существующих вычислительных архитектур. Это дает возможность разрабатывать хорошо масштабируемые алгоритмы и программы.

Рассмотрим задачу взаимодействия ударной волны с областями газа пониженной плотности в двухмерной постановке. Для построения достоверного и эффективного алгоритма будем работать с законами сохранения, записанными в консервативной форме. Система уравнений Эйлера, записанная в консервативной форме имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j + P \delta_{ij}) = 0, \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}[(e + P)u_i] = 0. \quad (1.3)$$

уравнение состояния запишем в виде:

$$P = (\gamma - 1)\epsilon, \quad (1.4)$$

В этих уравнениях (1.1)-(1.4) ρ - плотность, u - вектор скорости, P - давление, $e = 0.5 \rho u^2 + \epsilon$ полная энергия, ϵ - удельная внутренняя энергия.

Для решения данной задачи используется метод крупных частиц. Он состоит из трех этапов: эйлерового, лагранжевого и заключительного. Для решения задачи взаимодействия ударных волн с сферической областью, заполненной газом пониженной плотности, был построен параллельный алгоритм и программа. Задача была запрограммирована на языке Фортран фирмы PGI. Эта версия Fortran'a имеет операторы, которые поддерживают архитектуру CUDA. Для проверки предложенного алгоритма и программы был проведен ряд тестов. Тестирование программы проводилось на широко известных задачах Сода (Рис. 1) и Лакса (Рис. 2). На этих рисунках сплошной линией обозначены аналитические решения, а пунктирной — результаты численных расчетов.

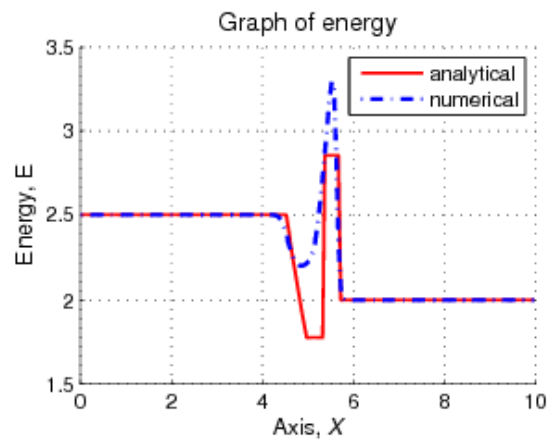
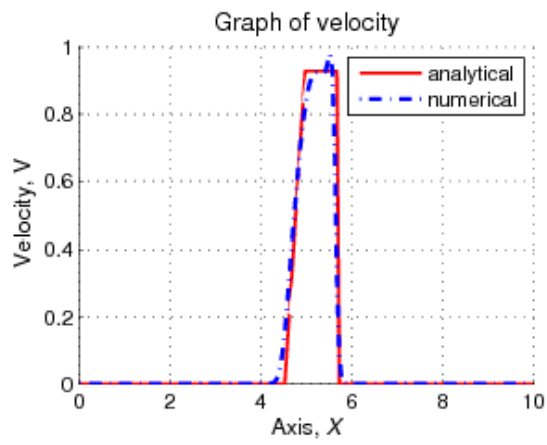
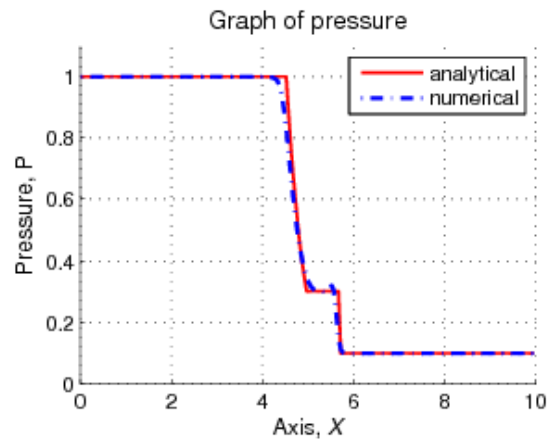
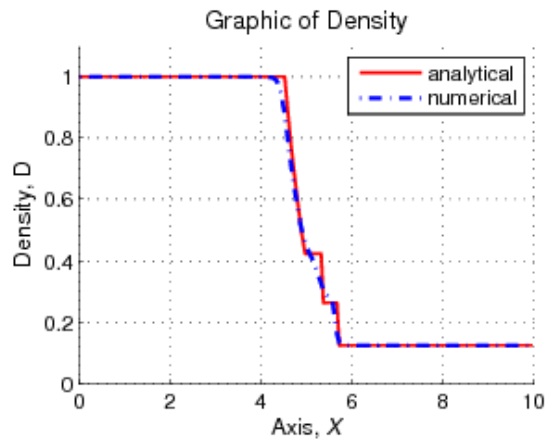


Рис. 1. Тест Сода.

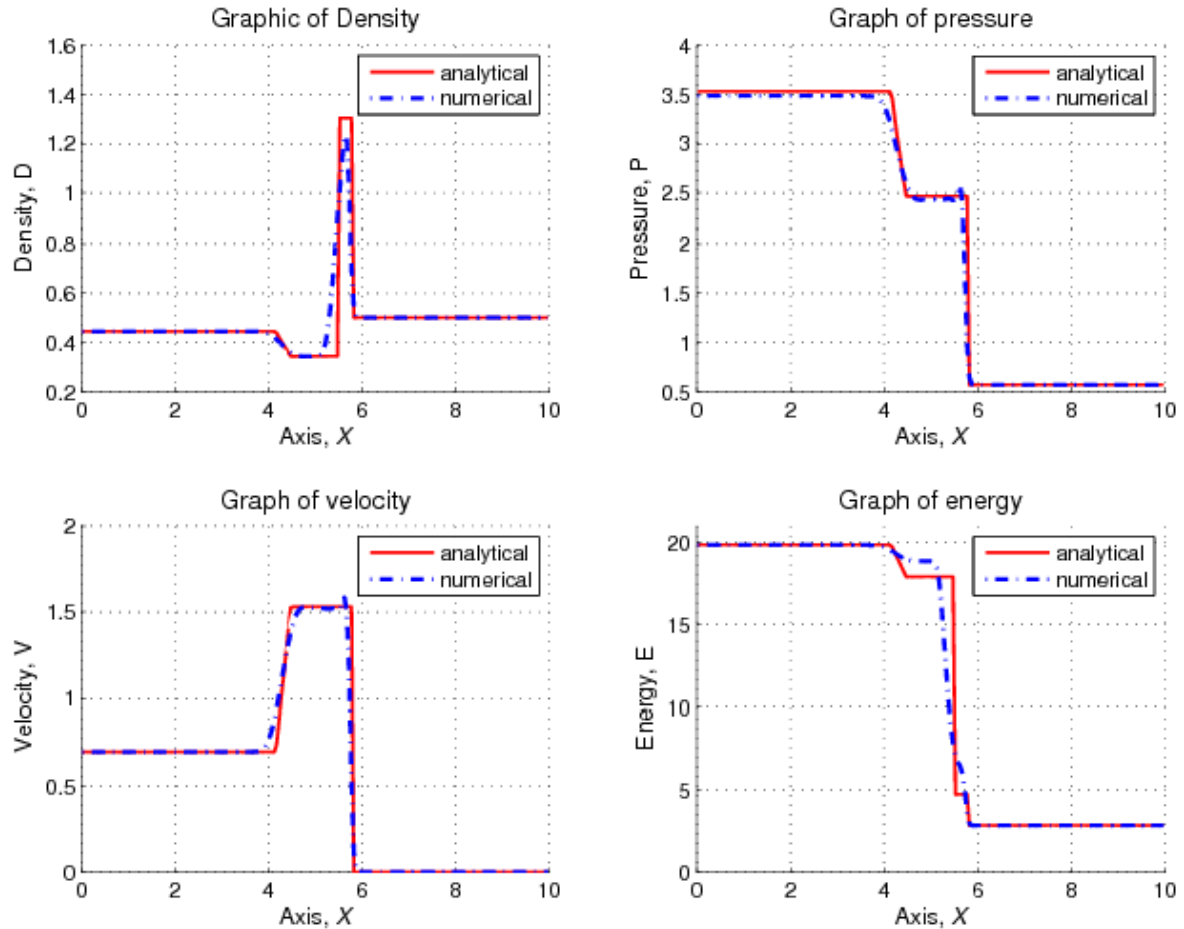


Рис. 2. Тест Лакса.

Обе задачи решались на отрезке $x \in [1, 10]$. Начальные условия слева и справа от диафрагмы в задаче Сода имеют вид:

$$(\rho^L, u^L, P^L) = (1, 0, 1), (\rho^R, u^R, P^R) = (0.125, 0, 0.1).$$

Для задачи Лакса:

$$(\rho^L, u^L, P^L) = (0.445, 0.698, 3.528), (\rho^R, u^R, P^R) = (0.5, 0, 0.571).$$

Отметим хорошее совпадение результатов численного расчета с аналитическим решением.

Рассмотрим задачу взаимодействия плоской ударной волны со сферической областью разреженного газа [4,5]. Расчетная область представляет собой квадрат со стороной, состоящей из $m \times m$ ячеек, заполненный покоящимся газом с плотностью $\rho_0 = 2.4$ и давлением $P_0 = 1.0$. В центре этой области расположена область пониженной плотности, с радиусом $0.1 \cdot m \cdot x$. На фронте плоской ударной волны заданы параметры $P_1 = 5$ и $\rho_1 = 1$. Ударная волна движется сверху вниз и начинает взаимодействовать с областью пониженной плотности. Результаты этого взаимодействия показаны на Рис.3. Отметим, что со временем пузырек начинает выворачиваться и образовывать вихревую структуру [5].

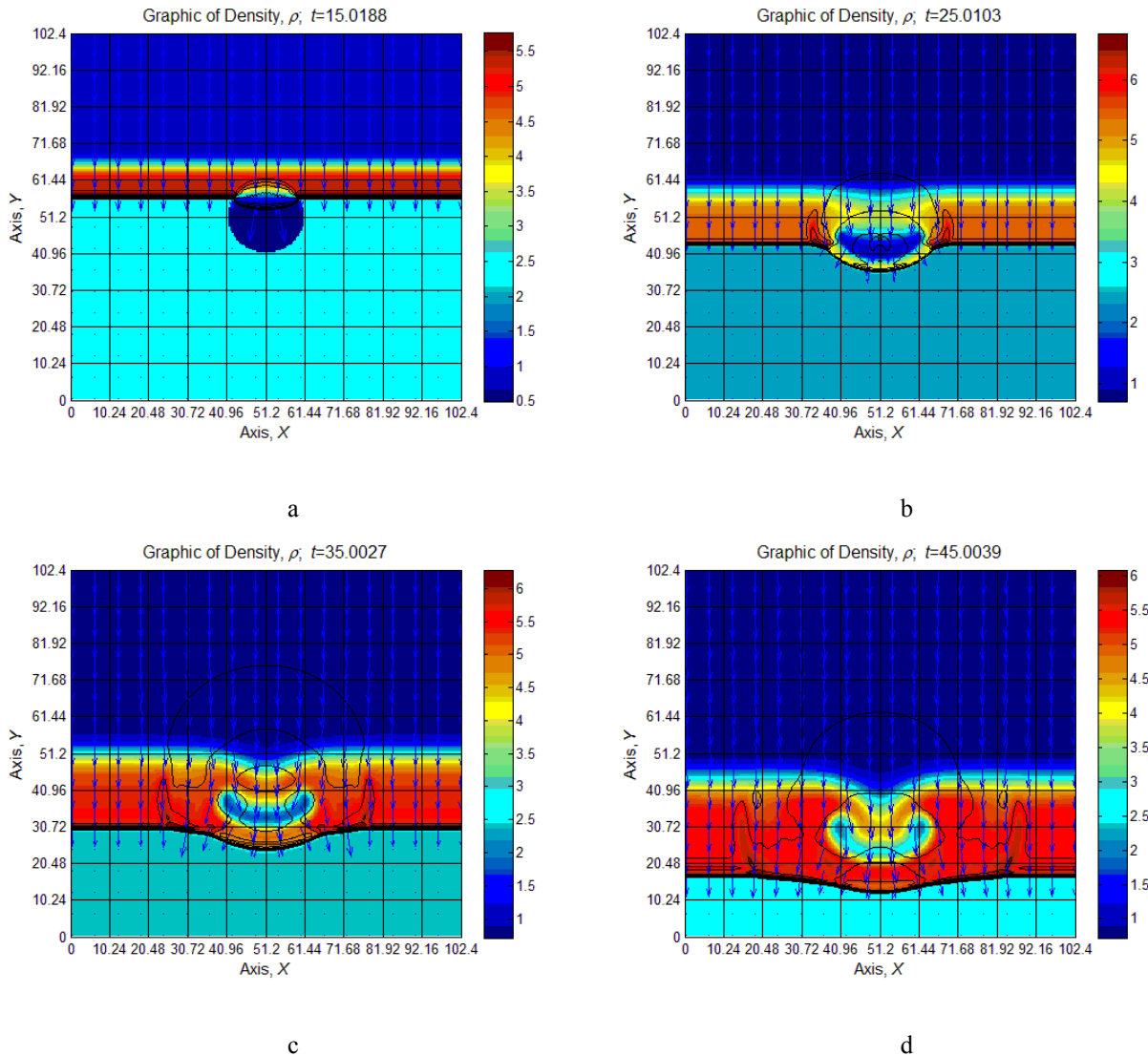


Рис.3. Взаимодействие плоской ударной волны с пузырьком пониженной плотности в различные моменты времени. Расчетная область покрыта сеткой 256×256 ячеек.

Построим параллельный алгоритм для задачи взаимодействия сферической ударной волны и сферической области, заполненной газом пониженной плотности. Расчетная область представляет собой квадрат со стороной, состоящей из $m \times m$ ячеек, заполненный покоящимся газом с плотностью $\rho_0 = 2.4$ и давлением $P_0 = 1.0$. В центре этой области разместим сферу с повышенным давлением, которая и будет источником ударной волны. Давление и плотность в этой области соответственно равняются $P_1 = 5$ и $\rho_1 = 1$, ее радиус равен $0.14 \cdot m \times$.

Область пониженной плотности представляет собой сферу с центром в точке $O_2(3m \times 10, 3m \times 10)$, плотность газа, заполняющего эту область $\rho_2 = 0.5$, радиус области равен $0.07 \cdot m \times$. Результаты взаимодействия сферической ударной волны со сферической полостью пониженной плотности в различные моменты времени приведены на Рис. 4.

Этот алгоритм будем распараллеливать с помощью технологии OpenMP. Она основана на введении в обычную последовательную программу специальных директив и процедур. В данной работе будем использовать директиву распараллеливания циклов:

```
!$omp do [опция [ [,] опция] ... ]
    структурированный блок
!$omp end do [nowait] ]
```

Для проведения расчетов на GPU построим параллельный алгоритм с использованием директив Акселератора фирмы PGI. Директивы акселератора позволяют быстро и достаточно эффективно использовать

возможности GPU. Эти директивы являются расширением стандарта ISO/ANSI для языков Фортран и С. В определенном смысле, эти директивы похожи на технологию OpenMP [3]. Таким образом параллельную область с помощью директив акселератора можно записать в виде:

```
!$acc region [опция [ ,опция] ... ]
    структурированный блок
!$acc end region
```

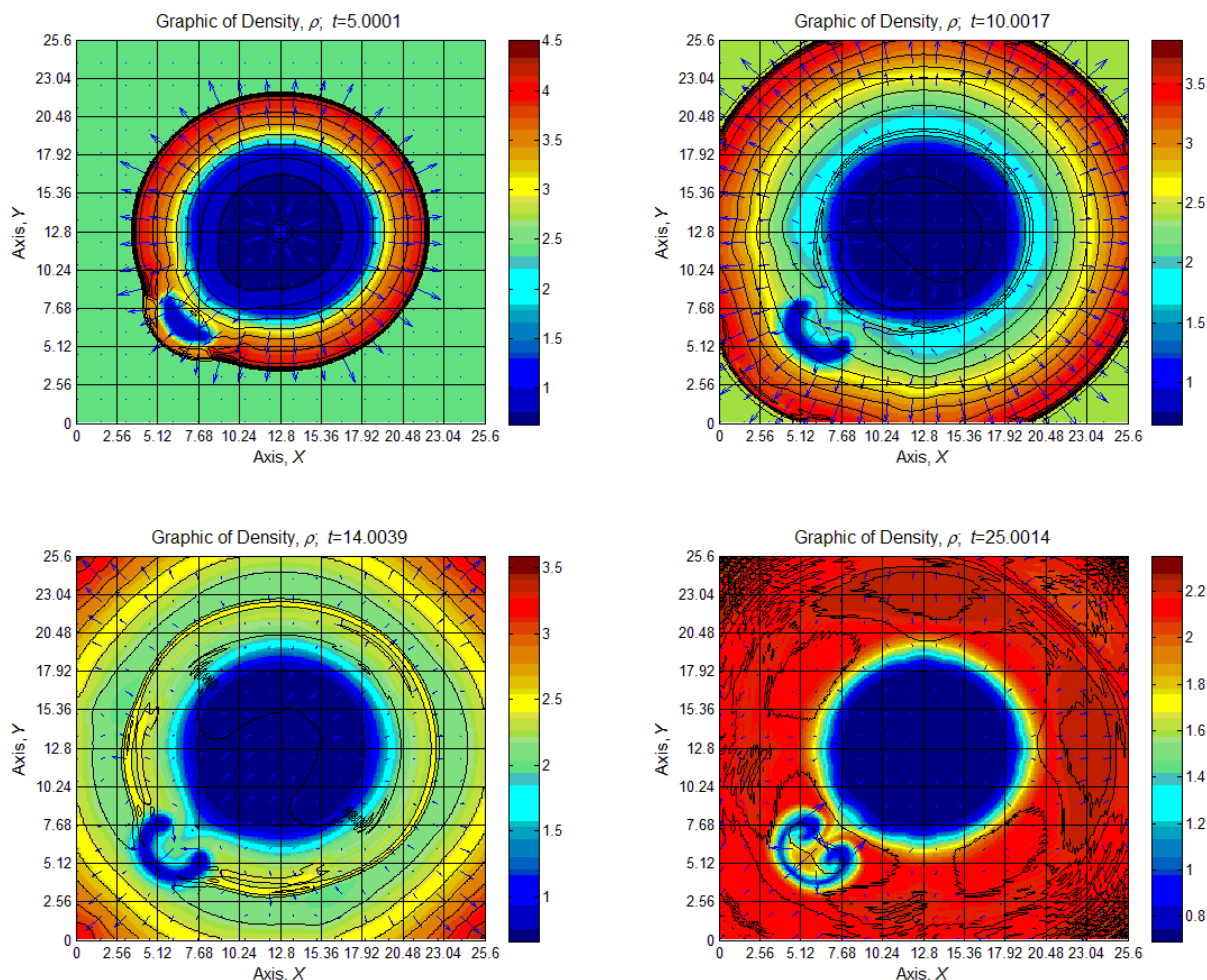


Рис. 4. Взаимодействие сферической ударной волны с пузырьком. Область 256x256 ячеек с шагом $dx=dy=0.1$.

Эти директивы определяют блок в программе, который будет откомпилирован для выполнения на графическом ускорителе.

Результаты исследования. Все расчеты проводились на процессоре Intel Core i5-460M и графической видеокарте NVIDIA GeForce GT 420M с объемом памяти 1Gb. Процессор обладает технологией Hyper-threading, т.е. процессор имеет два физических и два виртуальных ядра. Данный факт объясняет незначительное ускорение на 4-х потоках относительно 2-х.

Результаты исследования по распараллеливанию двумерной задачи взаимодействия ударной волны с сферической областью, заполненной газом пониженной плотности приведены в Табл. 1

Табл. 1. Время выполнения в секундах и ускорение для области 2048x2048.

Режим	Время расчета	Ускорение
Release	21760,27	1
OMP 2 потока	15384,67	1,41
OMP 4 потока	14975,91	1,45

Акселератор	9087,64	2,3
-------------	---------	-----

На Рис. 5 приведено время работы для различных вариантов распараллеливания. На графике сплошной линией синего цвета изображено время счета в режиме Release без использования каких-либо средств распараллеливания, сплошной линией зеленого цвета и пунктирной линией красного цвета изображено время счета, полученное при распараллеливании с помощью технологии OpenMP с двумя и четырьмя нитями соответственно, линия бирюзового цвета представляет время счета на графическом ускорителе.

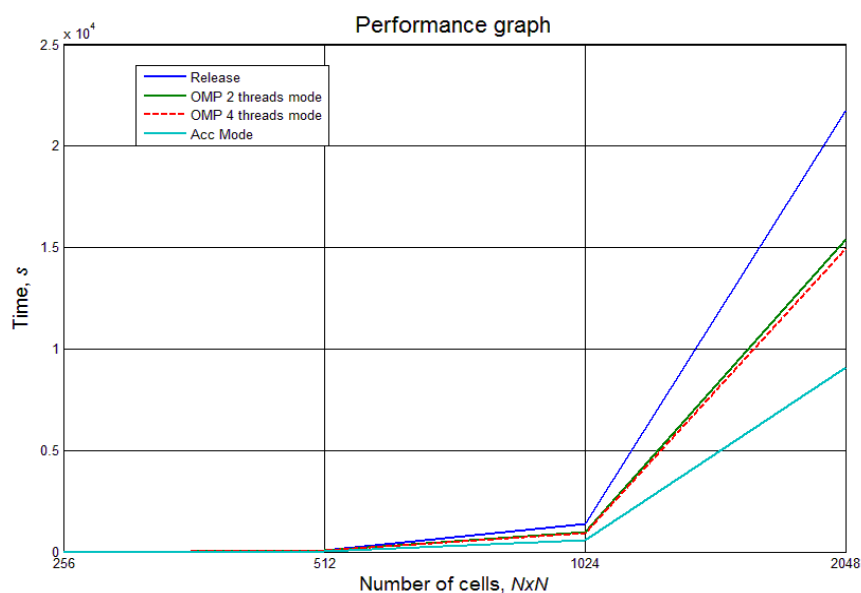


Рис. 5. Время работы программы с использованием различных технологий распараллеливания.

Выводы. В работе были рассмотрены задачи взаимодействия плоской и сферической ударных волн с областями пониженной плотности. Полученные результаты показывают, что наиболее эффективным является распараллеливание с помощью графических ускорителей, кроме того, ускорение увеличивается с увеличением области расчета. Это можно объяснить увеличением количества арифметических операций на графическом ускорителе по отношению ко времени, затраченном на передачу информации между CPU и GPU. Хороший результат показал метод OpenMP. С его помощью удалось существенно увеличить быстродействие программы. Необходимо также отметить, что можно использовать несколько методов распараллеливания. Для получения наибольшей эффективности их желательно комбинировать, выбирая в алгоритме те его части, которые больше всего подходят для того или иного метода распараллеливания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. Метод крупных частиц в газовой динамике. Москва, Наука, 1982г.
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Гидродинамика. 1987, Москва, Наука 733 стр.
3. Б.П. Рыбакин. Параллельное программирование для графических ускорителей. Москва, Изд. НИИСИ РАН, 2011 г., 261 стр.
4. R. Liska, B. Wendroff. Comparison of several difference schemes on 1d and 2d test problems for the Euler equations SIAM J. Sci. Comput. 2003. 25, N 3. 995–1017.
5. Б.П. Рыбакин, Н.И. Шидер. Построение параллельных алгоритмов для решения задач гравитационной газовой динамики. Журнал Вычислительные Методы и Программирование. 2010. Т. 11, стр. 388-394.
6. E. Toro. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997.
7. А.С. Антонов. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP. -М: Издательство Московского Университета, НИВЦ, 2009.