

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА МВС ДВУХ- И ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

С.В. Поляков, Т.А. Кудряшова, А.А. Свердлин, Э.М. Кононов

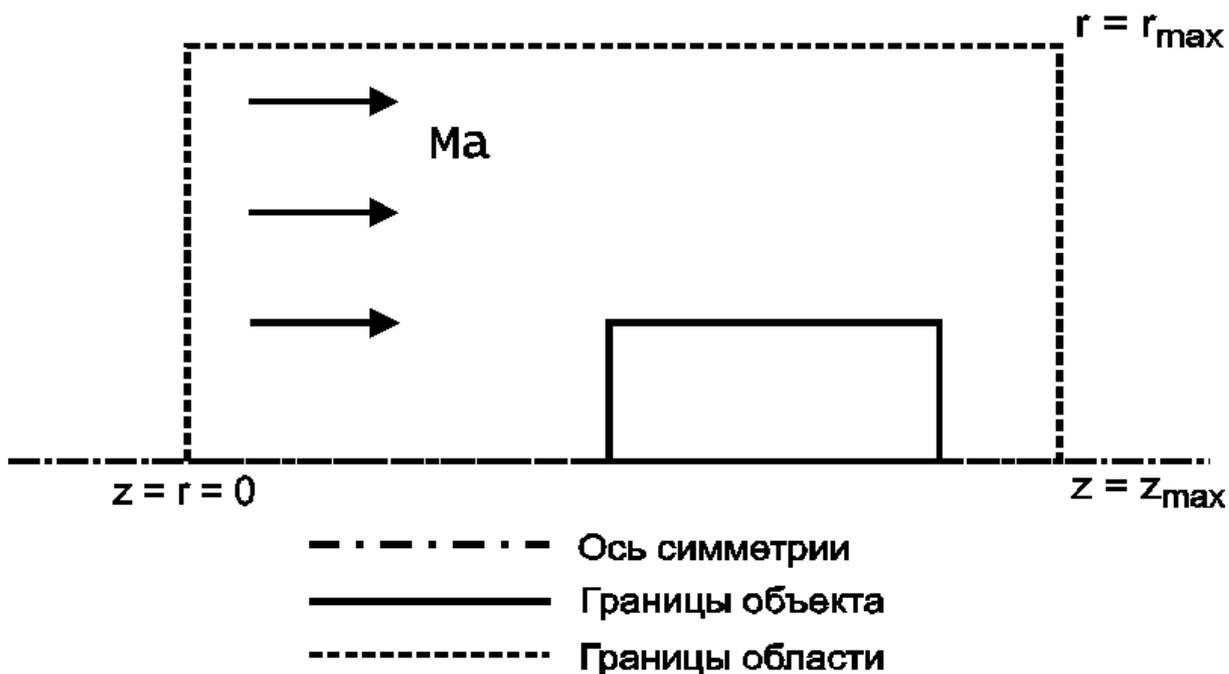
В последние годы происходит стремительное развитие вычислительной техники, и как следствие, многопроцессорных вычислительных систем (МВС). Это позволяет по-новому посмотреть на некоторые математические модели, которые ранее были «заморожены» по причине слишком высокой вычислительной ресурсоемкости. К таковым относятся многие модели радиационной газовой динамики (РГД). При входе летательного аппарата в атмосферу Земли на высоких скоростях начинает протекать ряд процессов, в том числе сильный нагрев газа, что влечет за собой процессы радиационного излучения. При температуре 1000К и выше эти процессы начинают оказывать существенное влияние на развитие течения, и его дальнейшее рассмотрение без учета излучения становится некорректным [1].

В настоящей работе предлагается комплексный подход к описанию и методам расчета параметров газа вокруг спускаемого в атмосфере Земли летательного аппарата с учетом радиационных процессов. Предлагается относительно новый подход прямого численного моделирования радиационных процессов, ориентированный на применение высокопроизводительных МВС. Математическая модель переноса излучения рассматривается в диффузионном приближении с дискретизацией спектра излучения и поглощения на 600 групп. Газодинамическая часть модели представлена системой квазигазодинамических уравнений (КГД) [2] с радиационной поправкой в уравнении энергии. Для анализа предлагаемой модели приводятся результаты моделирования течения газа с учетом радиационных процессов для объектов различной геометрии.

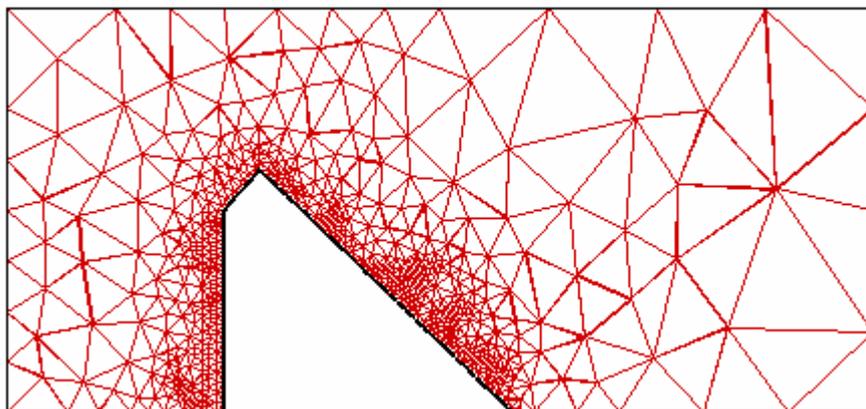
Одним из ключевых параметров в задачах радиационной газовой динамики является коэффициент поглощения света средой, который является функцией частоты, температуры и давления. При использовании многогруппового подхода спектр излучения делится на конечное число частотных интервалов, так называемых групп. В пределах каждого интервала коэффициенты поглощения усредняются по частоте (интегрируются) и в результате зависят только от температуры и давления.

Вопрос вычисления коэффициентов поглощения представляет собой весьма сложную физическо-химическую задачу. В работе использовались экспериментальные данные, представленные в работе [4]. Они содержат довольно широкую сетку температур и давлений для каждого спектрального интервала.

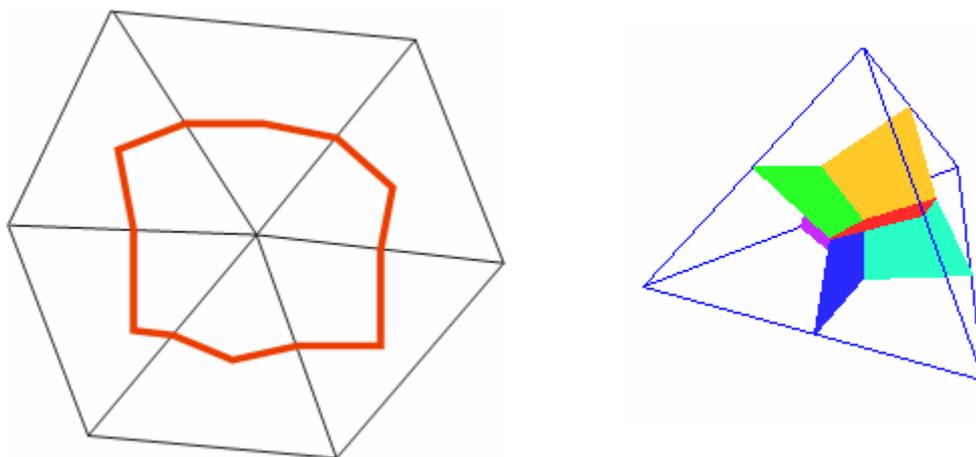
Расчетная область в модельной задаче представляет собой прямоугольник (параллелепипед в трехмерном случае), в которую помещен объект произвольной формы. На одной из граней области задается набегающий воздушный поток. В работе рассматривалась как декартова, так и осесимметричная цилиндрическая геометрия задачи.



Использование адаптивных треугольных и тетраэдральных сеток позволяет качественно и количественно учитывать многие особенности решения.



Аппроксимация строилась на основе интегро-интерполяционного метода с использованием барицентрических контрольных объемов. Такая методика позволяет сохранить симметричность эллиптического оператора при переходе к сеточным уравнениям.



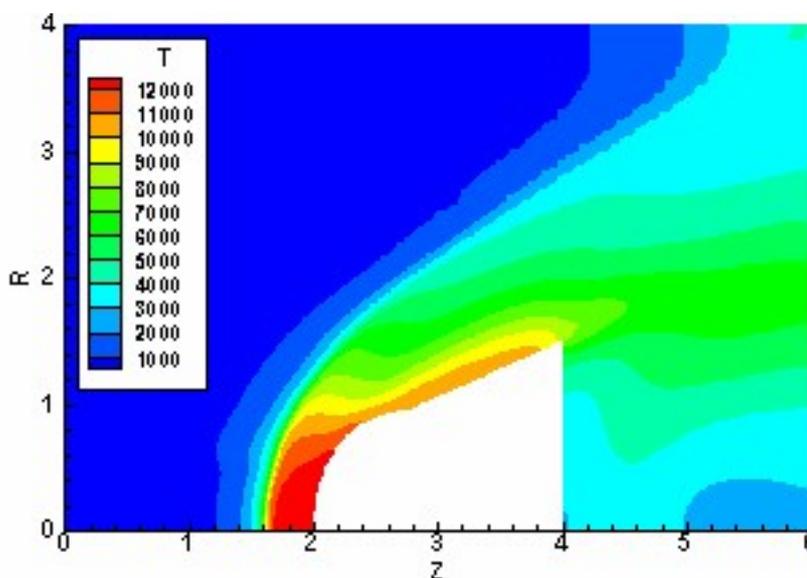
Как отмечалось выше, в расчетах использовалось 600 спектральных групп. Это означает, что при расчете радиационной поправки необходимо решать 600 систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с сильно разреженными матрицами. Для решения такого рода сеточных уравнений использовалось семейство итерационных методов, работающих в подпространстве Крылова. Был проведен сравнительный анализ алгоритмов (BCGSTAB, GMRES, SYMMLQ, MINRES) в комбинации с некоторыми методиками предобуславливания (неполное LU-разложение - ILU(0), неполное разложение Холецкого — ICC(0), диагональный метод Якоби). По фактической скорости сходимости (в секундах) наилучшее время показал BCGSTAB в комбинации с ICC(0). По итерационной скорости сходимости - GMRES(50) в комбинации с ICC(0). В качестве инструмента для решения СЛАУ использовался пакет PETSc [5].

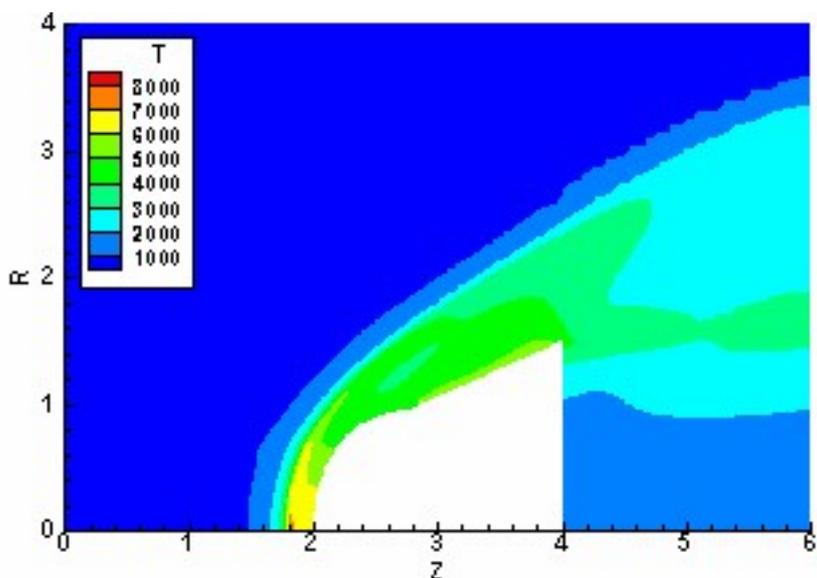
Независимое решение большого количества СЛАУ сразу дает три возможных схемы распараллеливания:

1. Групповое распараллеливание. Отдельно взятая группа целиком считается на одном процессоре. Таким образом, группы распределяются между процессорами. Когда все расчеты заканчиваются, результат решений суммируется. Достоинства такой схемы: простота программирования, высокая скорость расчета, возможность использовать любые методы решения СЛАУ и предобуславливания. Недостатки схемы: невозможность использовать число процессоров большее, чем число групп (более 600), отсутствие механизмов балансировки загрузки процессоров.
2. Распараллеливание решения СЛАУ. Для каждой группы используется тот или иной параллельный алгоритм решения СЛАУ, задействующий все процессоры. Такая схема по сравнению с групповым распараллеливанием имеет важное достоинство - возможность использования большого числа процессоров (больше числа групп). Однако эффективность такой схемы сильно падает с увеличением числа процессоров.
3. Гибридное распараллеливание. Все процессоры разбиваются на несколько множеств. Каждое множество процессоров получает некоторое количество СЛАУ для решения. При этом каждая линейная система решается в параллельном режиме на процессорах множества. При этом целесообразно, чтобы каждое множество лежало на одном или нескольких узлах МВС, имеющих большую оперативную память и некоторое число ядер. Тогда накладные расходы на каждое решение СЛАУ существенно снижаются. Например, при использовании МВС с 8-ю ядерными узлами, целесообразно формировать множества процессоров по принципу: 1 множество на 1 узел. Такая схема позволяет эффективно использовать в расчетах до 4800 процессорных ядер.

В качестве тестовой задачи рассматривался объект, имеющий геометрические параметры, соответствующие возвращаемой капсуле проекта "Аполлон". Начальные параметры среды (температура, давление, плотность) соответствуют параметрам атмосферы Земли на высоте 100 километров. Скорость набегающего потока - 12 Махов.

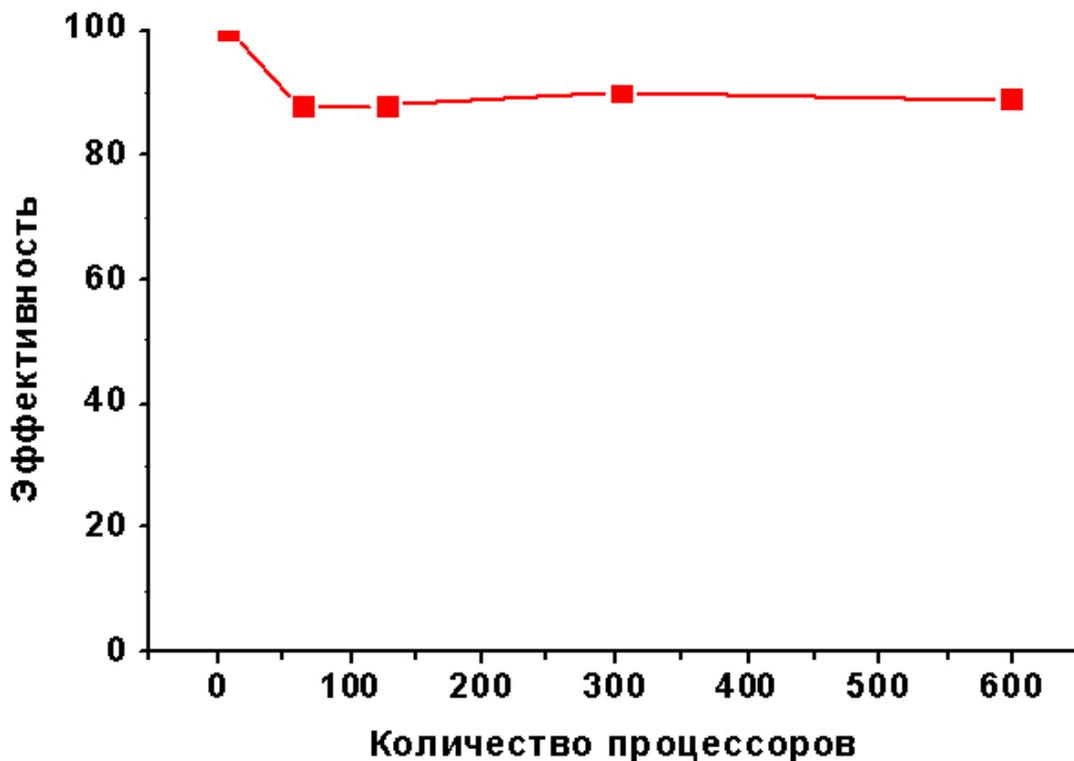
На рисунках представлены результаты двумерных расчетов обтекания тела для установившегося течения.



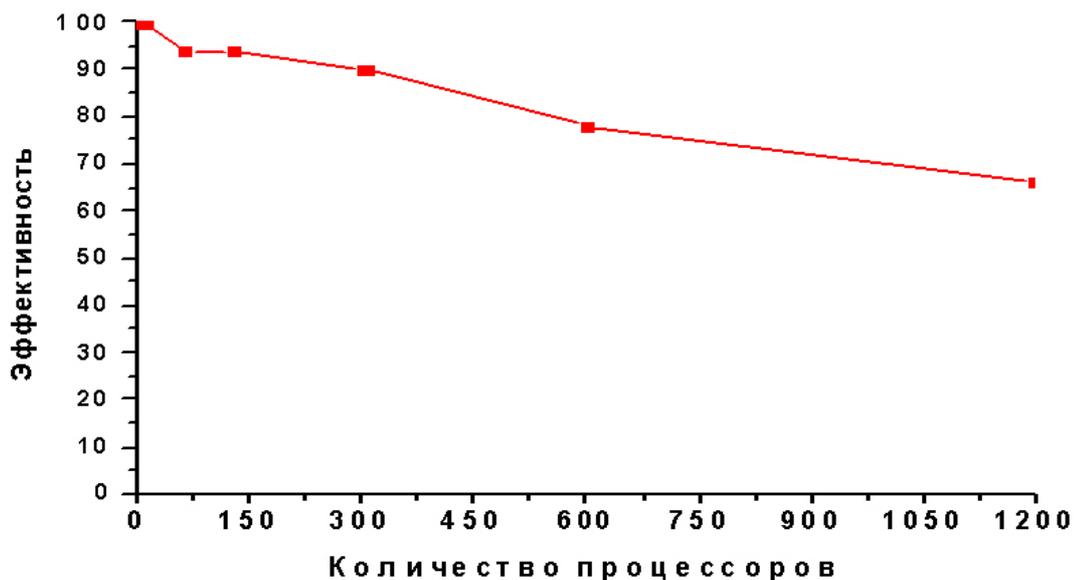


На 1-ом рисунке представлено поле распределения температуры без учета процессов радиационного излучения. На 2-ом рисунке - температура с учетом радиации. При наличии радиационного излучения можно наблюдать падение температуры примерно вдвое.

Предложенные алгоритмы распараллеливания показали свою высокую эффективность. Измерения проводились на кластерах СКИФ-МГУ и МВС-100k. Эффективность группового распараллеливания на 600 процессорах составляет 84%.



При гибридном распараллеливании (по 8 процессоров в множестве) - 79% для 600 процессоров и 66% для 1200 процессоров.



Хотя диффузионное приближение в силу своих ограничений на оптическую толщину среды не учитывает всех процессов, связанных с излучением газа, тем не менее, по результатам проведенных расчетов можно видеть важность включения в модель радиационных поправок.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Б.Н. Четверушкин. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. - М., Наука, 1985.
2. Т.Г. Елизарова. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. - М., Научный мир, 2007. - 352 с.
3. Т.А. Кудряшова, С.В. Поляков, А.А. Свердлин. Расчет параметров течения газа вокруг спускаемого аппарата.// Математическое Моделирование, 2008, 20(8) (в печати).
4. И.В. Авилова, Л.М. Биберман и др. Оптические свойства горячего воздуха, Наука, 1970. - 318 с.
5. Satish Balay and Kris Buschelman and William D. Gropp and Dinesh Kaushik and Matthew G. Knepley and Lois Curfman McInnes and Barry F. Smith and Hong Zhang, "PETSc Web page", <http://www.mcs.anl.gov/petsc>, 2001.