

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ И ИХ ПРОГРАММНЫЕ РЕАЛИЗАЦИИ ДЛЯ СУПЕРЭВМ

И.М. Куликов, Г.Г. Лазарева

В последнее десятилетие из всего широкого диапазона газодинамических численных методов для решения нестационарных задач астрофизики в трехмерной постановке используются два основных подхода. Это лагранжев метод сглаженных частиц SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) и эйлеровы методы на адаптивных сетках AMR (Adaptive Mesh Refinement). На основе метода SPH созданы пакеты математического моделирования Hydra, Gasoline, GrapeSPH, GADGET. С помощью эйлеровых методов на адаптивных сетках AMR реализованы пакеты NIRVANA, FLASH, Pencil Code, ZEUS.

Разработка большого количества пакетов программ свидетельствует не только о крайней актуальности развития моделирования в этом направлении, но и об отсутствии универсального пути решения такого типа задач. В настоящее время исследователи еще находятся в стадии поиска наиболее эффективных подходов к построению вычислительных моделей и алгоритмов. Этот поиск осложняется большим количеством проблем вычислительного характера: сложность построения эффективных алгоритмов для комплекса взаимосвязанных задач и все проблемы, связанные с необходимостью параллельных вычислений.

Сравнение методов SPH и эйлеровых методов с использованием AMR позволяет определить основные преимущества одного метода над другим. Несомненным достоинством метода сглаженных частиц является простота программной реализации и возможность расширения метода на многомерный случай. Применение эйлеровых сеточных методов к решению задач в многомерной постановке является достаточно сложным. Лагранжев подход позволяет частицам, представляющим элементы жидкости, следовать течению, в то время, как решение, полученное эйлеровыми методами подвержено сеточным искажениям. Точность решения в итоге вычислений с помощью эйлеровых методов складывается из порядка точности самой схемы и разрешения расчетной сетки. Среди эйлеровых методов в последнее десятилетие наиболее популярны методы типа Годунова, которые не требуют введения искусственной вязкости для получения физически обоснованных решений. Прошло более двадцати лет с момента первого успешного применения эйлеровых методов к этому типу задач. Для более точного отражения структуры течения начали применяться адаптивные сетки, которые позволяют концентрировать вычислительные ресурсы в областях с низкой точностью расчетов. Методы построения адаптивных сеток можно трактовать как многосеточные техники с локальным переопределением, в которых расчетная область покрывается иерархическим множеством вложенных сеток с заданным ростом разрешения. При этом, с учетом консервативности нестационарных газодинамических уравнений, методы построения адаптивных сеток вносят дополнительные сложности в программную реализацию. Сравнение этих принципиально различных подходов к численной реализации газодинамических уравнений показывает, что оба подхода имеют свои ограничения и аспекты, требующие особого внимания.

Несомненно, разработка эйлеровых сеточных методов, не допускающих влияния сеточных линий на решение, позволит отказаться от методики AMR, а значит, избежать всех вышеперечисленных недостатков этого подхода. Создание таких методов представляет собой более сложную задачу, чем построение адаптивных сеток, но тем не менее возможно. Как известно, уравнения газовой динамики инвариантны относительно некоторой группы точечных преобразований в пространстве независимых и зависимых переменных. Такая инвариантность является следствием инвариантности законов сохранения, из которых вытекают уравнения газовой динамики.

Одной из основных функций, определяющих динамику самогравитирующего облака является гравитационный потенциал. Гравитационное поле вне тела зависит только от полной массы притягивающего тела. Распределение гравитационного потенциала внутри звезды описывается уравнением Пуассона, основной трудностью при решении этого уравнения является выбор граничных условий. В настоящее время существует большое число методов решения уравнения Пуассона.

В докладе приведен обзор параллельных реализаций метода сглаженных частиц, эйлеровых методов на адаптивных сетках для решения газодинамических уравнений. Проведена оценка эффективности и сложности параллельных реализаций методов решения уравнения Пуассона для гравитационного потенциала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-01-00615), Интеграционного проекта № 103, Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 - 2013 год" (контракт П1246).