

УДК 681.322:621.5.041:533.697:532.5

Ю.К. Чернышев, канд. техн. наук

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИСТЕМ ДЛЯ АЛГОРИТМИЗАЦИИ ПРЯМОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА

Введение

Представление сплошной среды в виде совокупности модельных частиц дало возможность Ньютону решить вариационную задачу по нахождению оптимальной формы обтекаемого тела; согласно его результатам в настоящее время конструируются головные части ракет. Новый толчок эта идея получила при возникновении современных вычислительных средств. В большинстве задач, решаемых с помощью модельных частиц, столкновения между частицами либо не учитывались, либо учитывались косвенно по методу Монте-Карло [1-3]. В предлагаемой работе модельными частицами служат упругие сферы без дальнего действия.

Формулирование проблемы

Простейшие алгоритмы, по которым можно рассчитать поведение системы во времени, наталкиваются на резкое увеличение объема вычислений при больших количествах модельных частиц и практически нереализуемы, если их больше 1000 (для самых мощных ЭВМ), что недостаточно для адекватного моделирования [4-5].

Основной проблемой при использовании метода модельных частиц является создание алгоритмов, с помощью которых количество частиц будет достаточным для статистических вычислений. В данной работе предлагается системный подход, согласно которому производится декомпозиция всего ансамбля упругих сфер на подсистемы. Модельные частицы в этом случае представляют собой автоматы с внутренними состояниями, изменяющимися в дискретные моменты времени. Расчет моментов, в которые происходят изменения состояний, оказывается, можно осуществить так, что реальным становится увели-

чение количества модельных частиц до десятков – сотен тысяч.

Описание расчетной схемы

В данной работе с целью оптимизации общего времени расчетов предлагается следующий вариант введения подсистем.

1. Расчетная область покрывается строго квадратной сеткой с единичной длиной сторон квадратов. Каждая ячейка обретает естественную мультииндексную нумерацию. Индексы ячейки, которой принадлежит частица, рассматриваемая как объект, относятся к свойствам частицы. К свойствам частицы относятся также ее номер, радиус, масса, координаты, проекции скорости, локальное время данной частицы, время до ближайшего события, связанного с данной частицей, вид этого события и некоторые другие, используемые при сборе статистических данных.

В свою очередь, ячейка-объект обладает свойством, выражаемым массивом ссылок на номера частиц, принадлежащих данной ячейке.

2. Все локальные времена частиц в начальный момент времени считаются нулевыми, а времена до ближайших событий выстраиваются в «хип», так что в вершине двоичного дерева находится номер частицы, участвующей в ближайшем по времени событии [4-6]. Среди событий в простейшем случае рассматриваются следующие: столкновение с другими частицами; столкновение со стенками ячейки, в которой находится данная частица. Стенки могут быть как проницаемыми, так и отражающими (участки границы области и внутреннего тела).

Системный подход заключается в том, что при нахождении событий, ближайших по времени, рас-

смаатриваются лишь те частицы, которые принадлежат данной подсистеме. Ею является совокупность, состоящая из данной ячейки и ее ближайших соседей.

3. После обнаружения «активной» подсистемы и активной частицы происходит изменение состояния этой частицы. Ее координаты изменяются по обычным законам прямолинейного движения, а локальное время принимает значение, равное текущему глобальному.

4. Дополнительные изменения свойств частицы-объекта связаны с типом события. В случае столкновения с другой частицей происходит перераспределение их импульсов с соблюдением законов сохранения. Если частица сталкивается с отражающим участком, то ее импульс изменяется в соответствии с выбранным законом (возможны как зеркальное отражение, так и отражение с трением или с добавлением импульса от «горячей» стенки).

Если же ближайшее событие связано с пересечением проницаемой стенки, то номер данной частицы передается в список частиц, принадлежащих ячейке, в которую она перелетает, с одновременным вычеркиванием его из списка той ячейки, которой она принадлежала.

5. В рассматриваемый момент глобального времени производится расчет времени до ближайшего для данной частицы события. Это время снимается с вершины дерева и «подвзывается» в виде нижнего листа, после чего «всплывает», т.е. становится в очередь [7]. Следует отметить, что время установления в очередь в реализованном в данной работе варианте имеет порядок $\log_2 n$, где n – общее количество частиц. Возможна также организация очереди с приоритетами с временным порядком $O(1)$ на базе «ковшовой сортировки», но это связано со значительными программными усложнениями, не окупающимися сокращением времени расчетов.

На этом один такт расчетов оканчивается. Существенным является то, что в предложенной рас-

четной схеме отсутствует групповое перемещение всех частиц в соответствии с течением глобального времени. Общее время на выполнение расчетов одного такта в основном зависит от поиска частицы, с которой может столкнуться данная. Без разбиения на подсистемы оно пропорционально общему количеству частиц, а в предложенном методе оно пропорционально количеству частиц, содержащихся в подсистеме; это различие является принципиальным.

Примеры тестовых расчетов

Течение Бенара

С помощью предложенного метода можно решать очень широкий круг задач. В частности, актуальным является расчет конвективных течений в атмосфере [8]. Тестом для любого метода газодинамических расчетов является задача Бенара, заключающаяся в установлении вида конвективного течения газа в гравитационном поле между слоями, нижний из которых имеет более высокую температуру, чем верхний. В жидкости течение оказывается структурированным: возникают «ячейки Бенара». На рис. 1 приведены устойчивые структуры, образующиеся в слое газа в указанных условиях, строение которых получено рассмотренным методом.

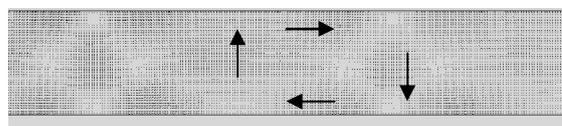


Рис. 1. Структурированное конвективное течение для 10000 модельных частиц

Сверхзвуковое обтекание тел

Хорошо известно, что только методами частиц можно получить результаты обтекания при больших числах Кнудсена [1]. Метод, рассматриваемый в данной работе, более пригоден для расчетов течений газа в нормальных условиях, поскольку оптимальная скорость вычислений достигается при количестве ячеек, сравнимом с количеством частиц. На рис.2 приведена система скачков уплотнения при обтека-

нии тела с заострением при $M = 2.8$.

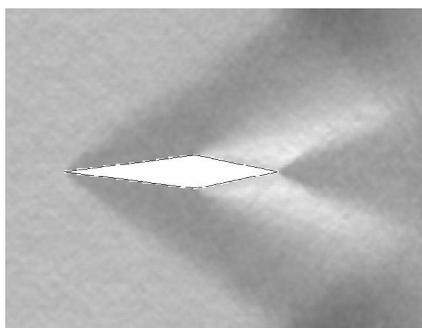


Рис. 2. Система скачков при обтекании тела с заострением при $M=2.8$ и $n = 57664$

Обтекание на дозвуковом режиме

С помощью предлагаемого системного варианта метода частиц оказывается возможным получение очень точной картины обтекания и при дозвуковых скоростях; дополнительно можно получить оценку подъемной силы и аэродинамического качества, подсчитав импульсы, переданные телу в результате столкновений частиц с отражающими участками в ячейках. На рис.3 приведено поле чисел Маха при обтекании одной лопатки венца осевого компрессора, если на входе $M=0.8$.

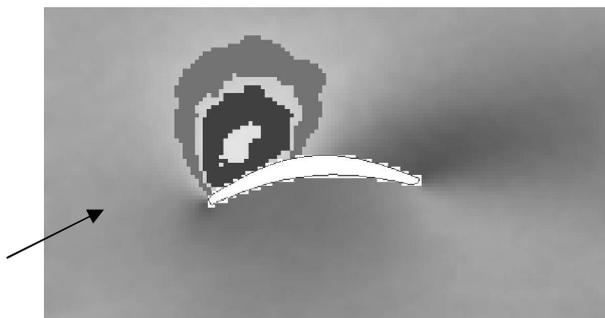


Рис. 3. Обтекание сечения лопатки. Темная кольцевая область - $M = 1 \pm 0.05$. $n = 48772$

Падение газовой струи на стену

Среди задач, которые в своей постановке содержат принципиальную неоднозначность, можно указать на задачу натекания струи газа из сопла на стенку в вакууме [2]. Очень трудно определить, в какой части струи она представляет собой «сплошную среду», а в какой – разреженный газ, вследствие

чего привлечение уравнений газодинамики усложнено. На рис. 4 приведено распределение чисел Маха в струе газа, падающей на подложку, полученное предлагаемым методом. Более светлые участки соответствуют большим значениям M ; наибольшее значение M для одноатомного газа в плоском случае равняется 3.9. Наиболее горячая область находится по центру струи у подложки; внутри «колокола» с большими числами Маха температура резко снижена.

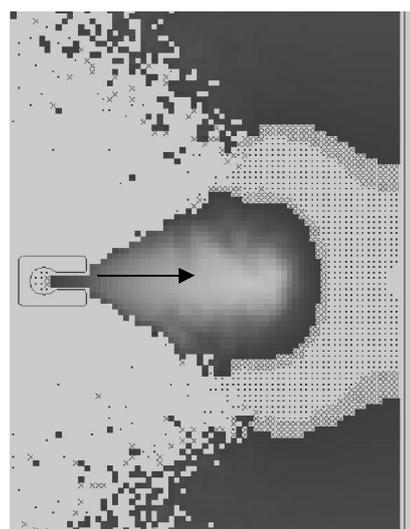


Рис. 4. Набегание струи газа в вакууме на подложку. Заштрихованная область соответствует $M < 1$

Заключение

В данной работе рассмотрена лишь малая часть задач, которые могут решаться системным методом модельных частиц. Для их решения первоочередным является совершенствование основных алгоритмов упорядочения и декомпозиции. Можно, в частности, добиться значительного увеличения общего числа частиц введением не только подсистем, как в данной работе, а и «надсистем», запоминая в памяти ЭВМ потоки вылетающих частиц и передавая их с некоторой частотой соседним системам, что позволит производить расчеты на нескольких ЭВМ параллельно. Предложенная схема строго квадратных (кубических) сеток позволяет упростить процедуру передачи потоков.

Одно из перспективных направлений, для которого предложенный метод, по-видимому, является эффективным - моделирование течений газа из частиц, принадлежащих различным веществам, которые могут вступать в химические реакции. Это можно учесть на микроуровне введением нового типа событий, зависящих от переданного импульса и приводящих к изменению количества частиц и их энергий.

Список литературы:

1. Харлоу Ф.Х. Численный метод крупных частиц в ячейках для задач гидродинамики // *Вычислительные методы в гидродинамике* / Под ред. Б. Олдер, С. Фернбах, М. Ротенберг. – М.: Мир, 1967. – 384 с. 2. Берд Г. Молекулярная газовая динамика. М.: Мир, 1981. – 313 с. 3. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. – М.: Мир, 1987. – 638 с. 4. Чернышев Ю.К. Методы снятия информации о состоянии газового потока в процессе молекулярно-динамического моделирования // *Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделиро-*

*вания, вычислительного и физического экспериментов: Междунар. науч.-техн. конф. (26-29 сент. 1994 г.). – Змиев, 1994. – Ч. 1. – С. 39 – 40. 5. Чернышев Ю.К. Прямое моделирование течения газа в каналах сложной формы при малых числах Кнудсена // *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Междунар. науч.-техн. конф. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения НАН Украины, 1997. – С. 238 – 240. 6. Левин С.С, Чернышев Ю.К. Алгоритмизация прямого моделирования методом частиц течения газа по каналам сложной формы при малых числах Кнудсена // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: ХАИ, 2002. – Вып. 14. – С. 54 – 60. 7. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы. Построение и анализ. – М.: МЦНМО, 2000. – 955 с. 8. Белоцерковский О.М., Андрущенко В.А., Шевелев Ю.Д. Динамика пространственных вихревых течений в неоднородной атмосфере. Вычислительный эксперимент. – М.: «Янус-К», 2000. – 456 с.***

УДК 621.181:662.9

П.М. Канило, д-р техн. наук Н.И. Расюк, канд. техн. наук, А.В. Тымчик, канд. техн. наук, К.В. Костенко, инж., В.Е. Костюк, канд. техн. наук, А.Н. Коваленко, асп.

ОТРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СВЧ-ПЛАЗМЕННОЙ ГОРЕЛКИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ АЭРОСМЕСИ

Введение

Уголь – главный источник энергоресурсов в топливно-энергетическом комплексе Украины. В последнее время, в связи с изменением технологии добычи угля и выработкой запасов на существующих шахтах, качество поступающего на электростанции угля резко ухудшилось [1]. Одним из перспективных путей решения проблемы сжигания низкокачествен-

ных углей, в том числе с низким содержанием летучих, является применение СВЧ-плазмотронов для розжига и стабилизации горения угольной пыли и вывода шлака.

Формулирование проблемы

Цель исследований, результаты которых представлены в данной работе, – отработка конструкции пылеугольного горелочного устройства с СВЧ-