

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В СИСТЕМЕ HDVIS

М.Е. Балашов, В.Д. Горячев, М.С. Иванов, Д.В. Хогяновский

Численное решение нестационарных задач трехмерной газовой динамики проводится с использованием высокого пространственного сеточного разрешения областей течения, с целью более предсказательного расчета течений и выделения особенностей в их структуре. Расчеты ведутся на многопроцессорных ЭВМ с использованием распараллеливания, что позволяет получить детальное описание динамического развития течения газа (при значительных вычислительных затратах). Проведение расчетов занимает достаточно большое время и порождает огромный объем информации о скоростных полях и полях давления и энергии, эволюционирующих во времени. Графическая обработка потока информации от решателя с передачей цифровых данных по сети становится трудоемким делом, занимающим много времени. Современные системы графической обработки в CFD используют новые, более скоростные, алгоритмы постпроцессинга, с параллельным рендерингом сцен объектов визуализации.

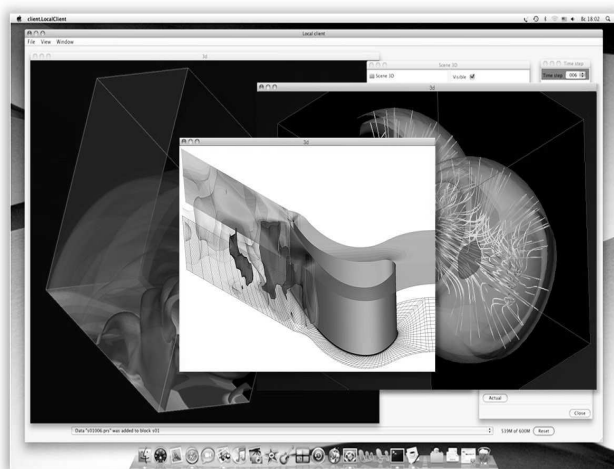


Рис. 1. Окна клиентской части системы HDVIS

визуализации: с выбором видов, заданием сечений и выделением областей анализа, построением карт распределения векторных и скалярных полей, генерацией изоповерхностей, линий тока или линий отмеченных частиц. Возможна обработка первичной информации с расчетом вторичных полей, с их связыванием и выделением особенностей течений и т.п. Автоматизация визуальной обработки позволяет монтировать представительный набор изображений, создавать анимационные ролики и вести сравнительный графический анализ результатов.

Программа HDVIS как JAVA-приложение предназначена для использования в различных операционных системах. Интерфейс системы визуализации в Mac OS X 10.5 Leopard показан на рис. 1. Система применяется для постпроцессинга результатов моделирования, проводимого с использованием кода SINF [1] и комплекса вычислительных программ лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН.

При визуальной обработке полей газодинамических течений используется практически весь набор графического описания течений: от построения трехмерного объемного изображения или изоповерхностей скалярных полей до зрительной имитации движения пленок по несущим поверхностям при анализе решения задач внешней аэродинамики. Сложное пространственное поведение рассчитанных полей вызывает необходимость их представления через использование двумерных разрезов и сочетание различной техники визуализации скоростных и переносных характеристик течений. Такое представление повторяет используемую в аэродинамическом эксперименте технику визуализации течений: создание струй включений в поток, нанесение на поверхности активных красителей, применение теневых фотографий, создание интерферограмм. Одним из способов представления волновых процессов в сверхзвуковых течениях является использование численных шлиренов [2,3]. Эта техника имитирует шлирен-визуализацию из эксперимента и позволяет выявить все характерные детали течения (ударные волны, волны разрежения, контактные разрывы). На основе данных численного моделирования вычисляется модуль градиента плотности и после использования фильтров картина течения визуализируется с помощью оттенков серого в подобранном нелинейном масштабе.

В качестве примера использования функций HDVIS дается анализ решения задачи, в которой изучались нестационарные эффекты от возмущения сверхзвукового течения при импульсном подводе энергии в область перед двумя симметричными клиньями [4]. Описание возникающего здесь перехода между регулярным и

Для анализа результатов моделирования в вычислительной гидродинамике перспективным является использование графических систем, разрабатываемых в клиент-серверной постановке. В предлагаемой системе HDVIS (High Definition VISualization) обработку гидродинамических полей нестационарных течений предлагается выполнять на основе задания первичного образа сцен в программном клиенте, с последующей передачей задания на автоматизированную обработку эволюционирующих во времени данных на сервер кластера или многопроцессорный комплекс ЭВМ. При анализе решения задач файлы данных представляют собой обычно результаты, относящиеся к какому либо временному слою задачи. На основе этих частных данных строится сцена

маховским отражением скачков от плоскости симметрии интересно тем, что, в определенных условиях, в потоке газа возможно существование двух различных волновых конфигураций и связанное с этим явление гистерезиса. Предполагалось, что использование двух стационарных ударно-волновых конфигураций при одних и тех же параметрах потока может быть использовано для управления течением - путем локального выделения энергии перед ударной волной [5].

В работе численно моделировался нестационарный процесс взаимодействия трехмерных ударно-волновых конфигураций регулярного (RR) и маховского (MR) отражения с возмущением, искусственно вводимым в набегающий поток сфокусированным лазерным импульсом.

Моделировалось трехмерное отражение скачков на плоскости симметрии между двумя бесконечно тонкими пластинами конечного размаха. Область расчета представлена на рис. 2, с учетом симметрии вычисления проводились в верхней четверти исходного пространства. Предполагалось, что энергия импульса, с центром его выделения на оси пересечения плоскостей симметрии, подводилась в газовый поток мгновенно, т.е. происходил изохорический нагрев газа.

Моделирование процессов, происходящих при отражении скачков, велось путем численного решения трехмерных нестационарных уравнений Эйлера, с использованием схемы сквозного счета на основе MUSCL TVD - реконструкции высокого порядка точности и алгоритма HLLC (Harten-Lax-van Leer-Einfeldt), применяемого для приближенного решения задачи Римана. Этот численный метод обладает высокой надежностью при моделировании течений с мощными ударными волнами и позволяет адекватно воспроизводить тонкие детали течения, такие как вихревые неоднородности.

Расчеты начинались с начальных данных о виде равномерного сверхзвукового газового потока и велись до установления стационарного регулярного отражения. Затем производилось возмущение плотности и вычисления продолжались до установления стационарной маховской конфигурации. В расчетах использовалась структурированная сетка с числом контрольных объемов 14 миллионов. Такое большое число ячеек было необходимо для адекватного разрешения деталей течения во всей расчетной области, включая фокальный объем и область взаимодействия. Сетка гладко сгущалась в окрестности области отражения скачка. Для верификации модели поглощения энергии предварительно было проведено численное моделирование импульсного энергоподвода в неподвижный воздух с помощью трехмерных уравнений Эйлера. Численные расчеты проводились на параллельном компьютере с использованием до 64 процессоров.

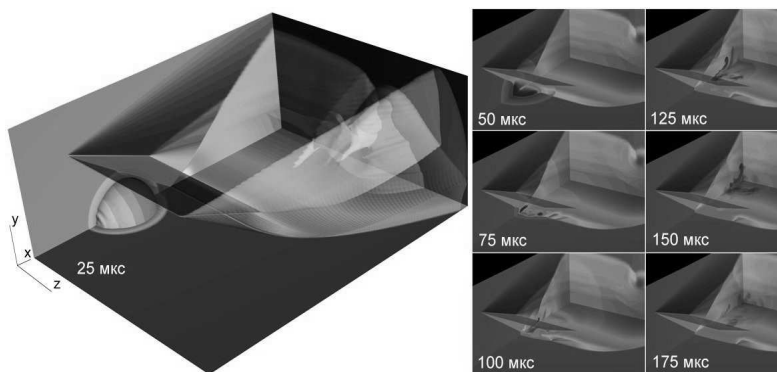


Рис. 2. Распространение волнового фронта давления и изменение плотности газа по мере развития процесса возмущения сверхзвукового газового потока от лазерного импульса (число Маха набегающего потока $M = 4$, угол падающего скачка $\alpha = 36^\circ$, энергия импульса 0.1 Дж).

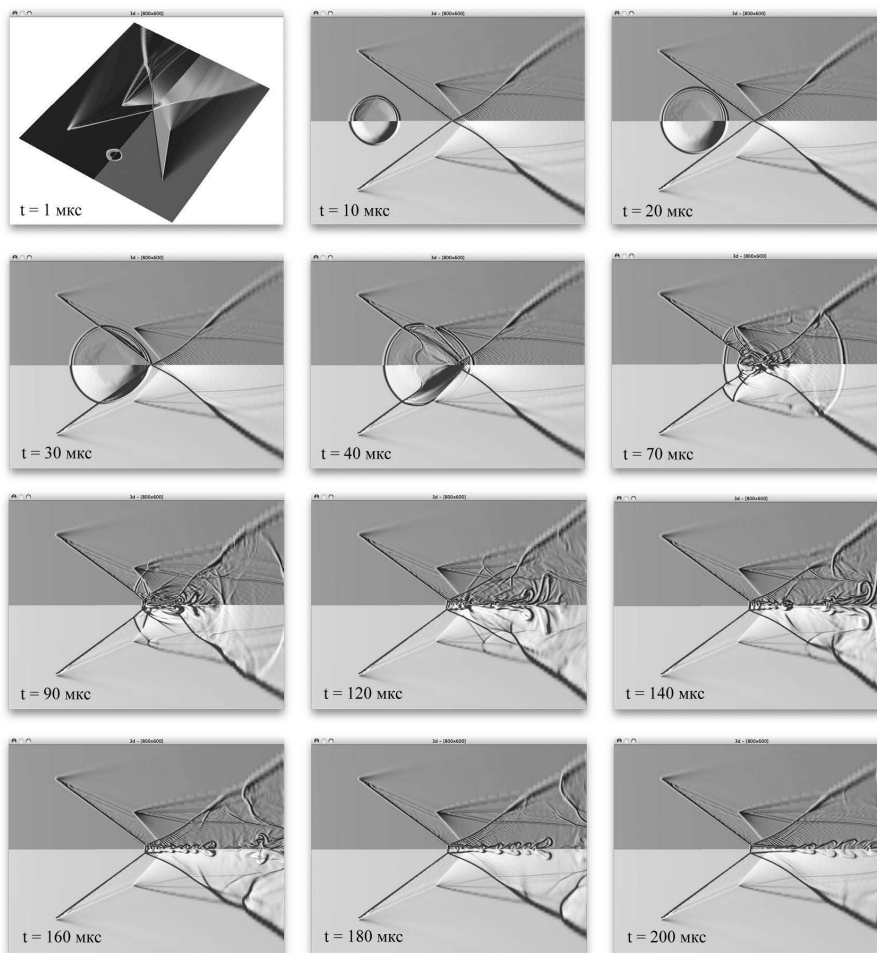


Рис. 3. Анимация перехода от регулярного отражения к маховскому, индуцированному лазерным тепловым импульсом

Процесс развития взаимодействия возмущения с потоком газа иллюстрируется на рис. 2, где приводятся карты распределения плотности в основных плоскостях симметрии расчетной области и на выходе из нее, а также изоповерхность ударной волны ($M = 1.1$), развиваемой во времени. Можно проследить за динамикой взаимодействия импульсного возмущения с ударными волнами при разрушении регулярного отражения и за возникновением маховского отражения, наступающего в момент времени порядка 70 мкс. После установления маховского отражения, за его поверхностью появляется дозвуковая замкнутая зона с вихревыми образованиями.

Более информативное восприятие процесса может быть получено с привлечением техники шлирен-фотографии потока в центральной плоскости симметрии. Весь процесс взаимодействия возмущения с потоком газа иллюстрируется на рис. 3, где представлены численные шлирены в различные моменты времени. Из приведенных кадров анимации процесса распространения возмущения в газовом потоке видно, что мгновенное выделение энергии в поток вызывает сильный нагрев газа в области фокального объема, и соответственно резкое увеличение давления, которое сопровождается образованием взрывной волны. В последующие моменты времени, взрывная волна и тепловое пятно начинают взаимодействовать с регулярной конфигурацией скачков. Когда тепловое пятно достигает области отражения скачка, регулярная конфигурация полностью разрушается, с образованием сложных ударно-волновых и вихревых структур. Вблизи плоскости симметрии при $t = 70$ мкс образуется искривленный дугообразный скачок, за которым формируется замкнутая дозвуковая область. Эта конфигурация постепенно трансформируется в маховское отражение скачка. В конечном итоге образуется установившееся маховское отражение. Аналогичный RR-MR переход наблюдался в расчетах и при других параметрах потока, в области двойного решения.

Расчет приведенных численных шлирен-изображений велся с использованием экспоненциального преобразования полей градиента плотности. Для сравнения в симметричной области дополнительно приводятся карты распределения собственно плотности газа. В обоих случаях, для выделения особенностей, дается дополнительное боковое подсвечивание горельефа распределения полей, задаваемое в плоскости сечения шлирена. Это позволило усилить выделение особенностей структуры потока через визуальную имитацию изменения градиента переменной плотности, связанного с изменением освещенности поверхности (графика)

функции распределения плотности. Последнее, в определенном смысле, повторяет экспериментальную методику шпирен-фотографий, получаемых по освещенности неоднородностей плотности газового потока в плоскости светового луча. Достаточно эффективным оказывается нанесение на поверхности горельефа карт распределения плотности и градиента плотности, в этом случае получали выразительные в информационном плане цветные шпирен-изображения.

В работе [4] дополнительно было проведено моделирование взаимодействия асимметричного возмущения (при смещении индуцированного лазерного импульса к передней кромке одного из клиньев) с маховской конфигурацией скачков. В этом случае наблюдалось также стационарное маховское отражение, которое, как выяснилось, является трехмерным комбинированным отражением. В результате исследований было установлено, что маховское отражение, в отличие от регулярного, является достаточно устойчивым к возмущениям, установленным в задаче. Остался открытым вопрос о возможности управления переходом от маховского отражения к регулярному при параметрах потока, соответствующих области двойного решения.

Разрабатываемую систему визуализации HDVIS используют в качестве графического постпроцессора при анализе решения задач вычислительной гидродинамики для течений различного масштаба, для обработки результатов моделирования с большим потоком данных и с удаленным управлением автоматизированной обработки данных.

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку работы (грант 08-07-00041-а).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Smirnov E.M., Abramov A.G., Ivanov N.G., Smirnov P.E., Yakubov S.A. DNS and RANS/LES-computations of complex geometry flows using a parallel multiblock finite-volume code, In: Parallel CFD – Advanced Numerical Methods, Software and Application, Elsevier, 2004, pp.219-226.
2. Quirk J.J. AMRITA – A computational facility (for CFD modeling) // VKI 29th CFD Series, 1998, P. 23-27.
3. A. Hadiadi, A. Kudryavtsev Computation and flow visualization in high-speed aerodynamics // Journal of Turbulence, - 2005. - V. 6, No. 16.
4. D. V. Khotyanovsky, A.N. Kudryavtsev, M.S. Ivanov Effects of a Single-pulse Energy Deposition on Steady Shock Wave Reflection. Shock Waves, Vol.15, No.5, 2006, pp. 353-362.
5. Третьяков П.К., Гаранин А.Ф., Грачев Г.Н., Крайнев В.Л., Пономаренко А.Г., Иванченко А.И., Яковлев В.И. Управление сверхзвуковым обтеканием тел с использованием мощного оптического пульсирующего разряда // Докл. Академии наук, 1996, Т. 351, № 3.