

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ С БОЛЬШИМ ОБЪЕМОМ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ HDVIS

М.Е. Балашов, В.Д. Горячев, Е.М. Смирнов

За последние годы резко возросли возможности численного моделирования турбулентных течений. Использование многопроцессорных вычислительных систем и распараллеливание вычислений позволяет проводить моделирование нестационарных течений с тепло- и массообменом и учетом химических реакций, решать сопряженные задачи и учитывать взаимодействие потока с границами тел в сложных по форме областях. Становится нормой использование вычислительных сеток с числом контрольных объемов порядка десятков миллионов. При моделировании турбулентных течений используются методы прямого численного моделирования (DNS) и метод больших вихрей (LES). Перспективно использование гибридных подходов, в которых, в пограничных слоях, метод LES замещается традиционным подходом, основанным на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS), в их нестационарной формулировке. Находит все большее применение метод моделирования отсоединенных вихрей (Detached Eddy Simulation, DES), позволяющий получить детальное описание эволюции потоков жидкости и газа на больших временных промежутках.

Проведение вычислений численными методами с высоким разрешением малых вихрей, определяющих генерацию турбулентности разных масштабов, занимает значительное время и порождает очень большой объем информации о скоростных и скалярных полях, эволюционирующих во времени. Объем данных достигает терабайтов. При работе вычислителя на кластере ЭВМ управление расчетами осуществляется через сеть, локальную или глобальную. Обработка потока информации от решателя с передачей цифровых данных по сети, становится трудоемким делом, занимающим много времени. Для преодоления возникающих проблем предлагается использовать систему с постпроцессингом результатов в клиент-серверной постановке.

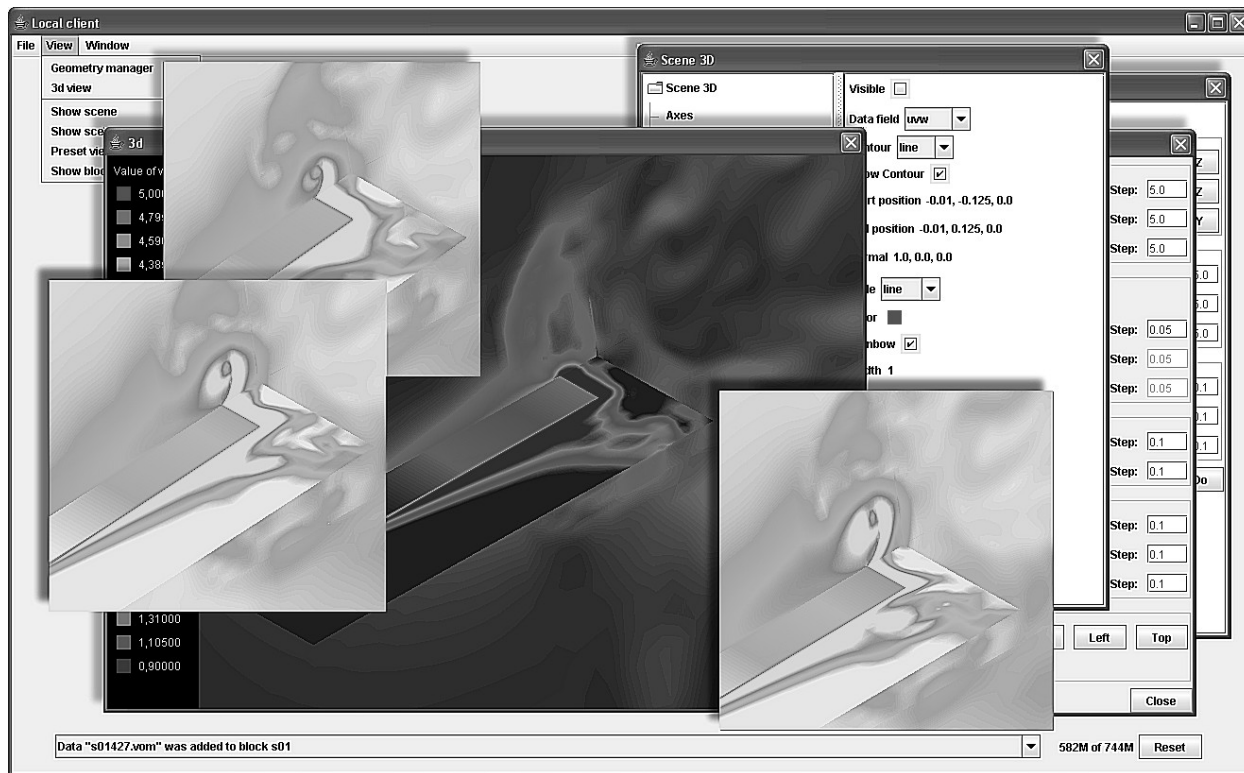


Рис. 1. Окна клиентской части системы HDVIS

В разрабатываемой системе обработка результатов гидродинамического моделирования HDVIS (High Definition VISualization) осуществляется на основе задания первичного образа сцен в программе-клиенте. Данные для этого (выделенные расчетные сетки блоков, рассчитанные первичные поля скоростей, давлений, температуры и т.п.) передаются с сервера в текстовом или бинарном формате. При анализе решения задач нестационарной гидродинамики эти файлы данных представляют собой обычно результаты, относящиеся к какому либо временному слою задачи. Если объем данных достаточен для анализа в клиентском приложении, большая часть построений выполняется без дополнительного обращения к базе данных. На основе этих частных данных строится сцена 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. Если требуется дополнительная информация о развитии исследуемого течения, то полученные программой-клиентом данные используются для предварительного построения сцены визуализации, используемой в дальнейшем в качестве шаблона. Все необходимые параметры установки сцены передаются на серверное приложение, где по заданному сценарию, с организацией распараллеливания (по временным фреймам или выделенным объемам), проводится рендеринг сцен визуализации. После получения множества изображений, последние передаются клиенту по сети. Поток данных по сети значительно снижается. Автоматизация визуальной обработки позволяет монтировать представительный набор изображений, создавать анимационные ролики и вести сравнительный графический анализ результатов.

В набор инструментов системы HDVIS входят опции, как традиционно используемые для визуализации течений на основе поверхностного и объемного рендеринга, так и новые функции, усиливающие информативность символического представления объектов визуализации, с функциями выявления связей между различными полями. Набор опций поддерживается эффектами контролируемой прозрачности и предпочтительного цветового решения графического представления. Комбинации используемых образов в построении сцен позволяют проводить качественный анализ сложных пространственных и временных структур течений.

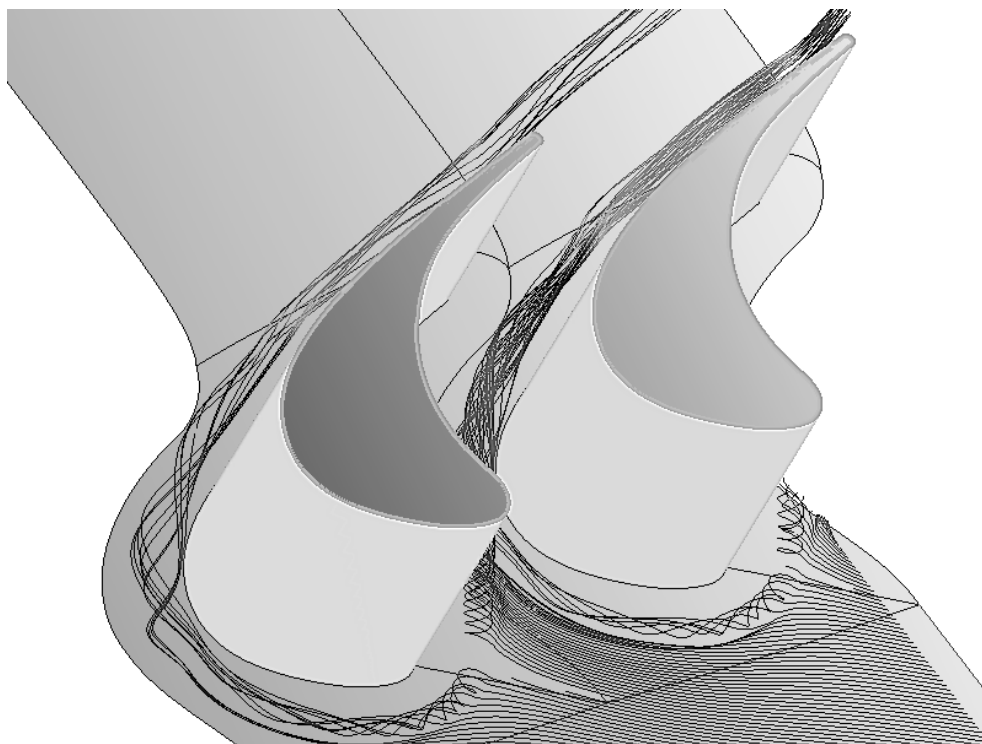


Рис. 2. Визуализация формирования вихревой структуры течения в пограничном слое потока газа через решетку лопаток компрессора

Алгоритмом обработки предусмотрены различные функции генерации графических образов, построение которых возможно вести с распараллеливанием вычислений. К ним относятся функции расчета траекторий отмеченных частиц и линий тока, генерация изоповерхностей скалярных полей с сопутствующими связанными

переменными, требующие больших временных затрат для визуального представления распределенных в пространстве и времени данных.

К настоящему времени система используется для обработки структурированных данных. Код программы создается с учетом графического представления данных и на неструктурированных сетках, а также с учетом возможной обработки результатов моделирования течений методами молекулярной динамики, без сеточного представления данных.

Программы клиент-серверной системы HDVIS создаются как JAVA-приложения и могут работать в различных операционных системах. Вид интерфейса системы визуализации показан на рис. 1. В настоящее время система используется для постпроцессинга результатов моделирования, выполняемого с использованием кода SINF [1].

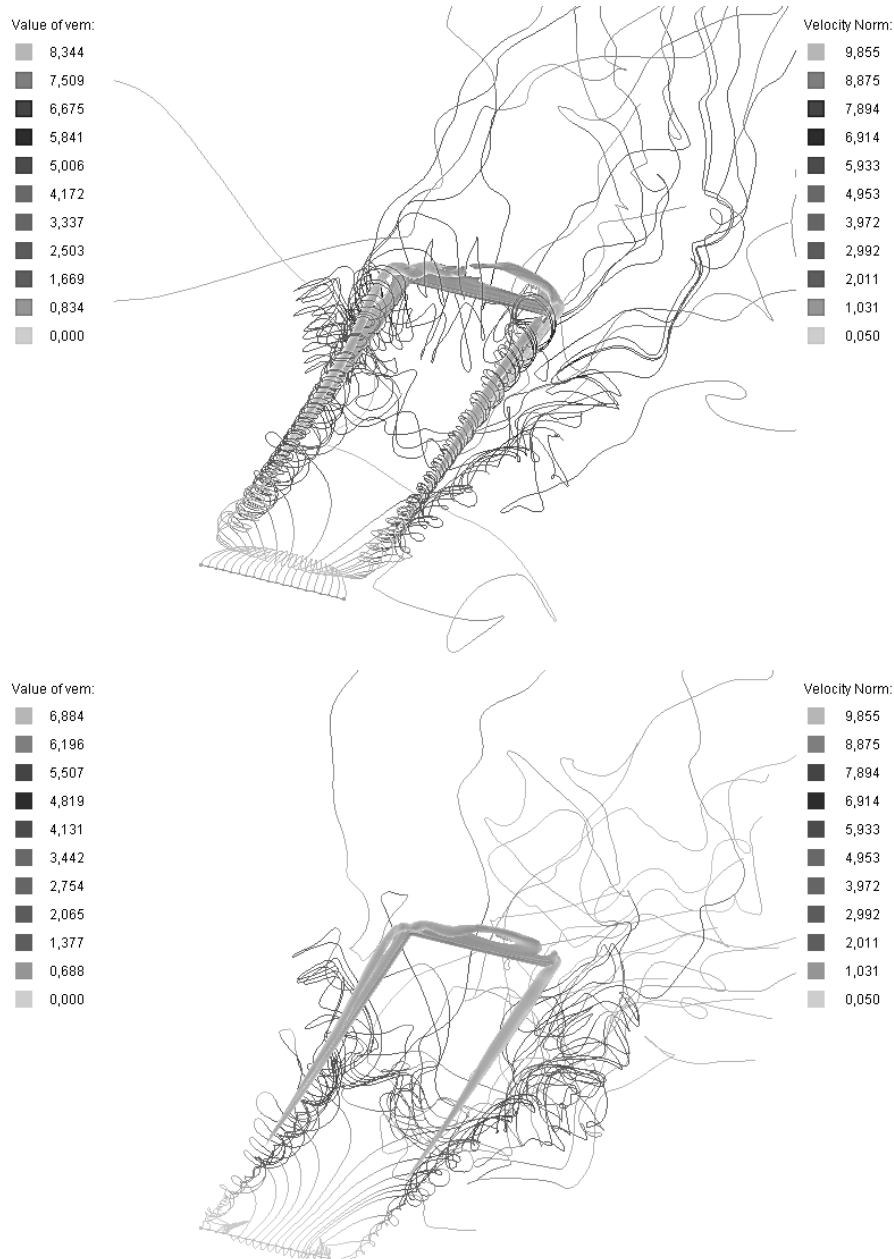


Рис. 3. Формирование и срыв вихрей с боковых кромок вибрирующей пластины для нестационарного течения в различные моменты времени, сочетание с изоповерхностью Q-критерия

В качестве примера приводятся результаты графической обработки результатов вычислений для двух задач: численного исследования трансзвукового течения в решетке лопаток компрессора [1] и вычислительного эксперимента по моделированию нестационарного течения газа, генерируемого колебаниями вибрирующей пластины [2]. Соответствующие иллюстрации приводятся на рис. 2–4.

На рис. 2 изображен один из кадров анимации формирования линий тока в тонком пограничном слое течения газа в решетке лопаток. Здесь видно формирование подковообразной структуры перед лопатками и вихревых жгутов на их тыльной стороне.

На рис. 3. приведены временные фреймы движения газа вокруг вибрирующей пластины. Задача решалась в общей трехмерной нестационарной постановке с учетом аэроупругого взаимодействия турбулентного потока и вибрирующей пластины. Использовалась многоблочная, адаптируемая к движущимся границам, расчетная сетка. На рисунке приведены траектории частиц в вихрях, срываемых с боковых кромок пластины, в окрестности которых формируются зоны наибольшей завихренности течения. Эти зоны показаны изоповерхностями Q-критерия ( $Q=30$ ), определяющего баланс между локальной завихренностью и сдвиговыми напряжениями в турбулентном потоке [3]. Изоповерхности этого критерия, позволяют выделить крупномасштабную структуру турбулентности (рис. 4.). С использованием такого представления был проведен анализ возникающих в области кромок пластины и на её поверхности вихрей разных масштабов. Была выявлена структура течения в следе пульсирующего течения за пластиной, механизмы подсоса газа к передней её кромке и формирования  $\Omega$ -образных вихрей, отходящих от поверхности пластины в области наибольшей амплитуды колебаний [2].

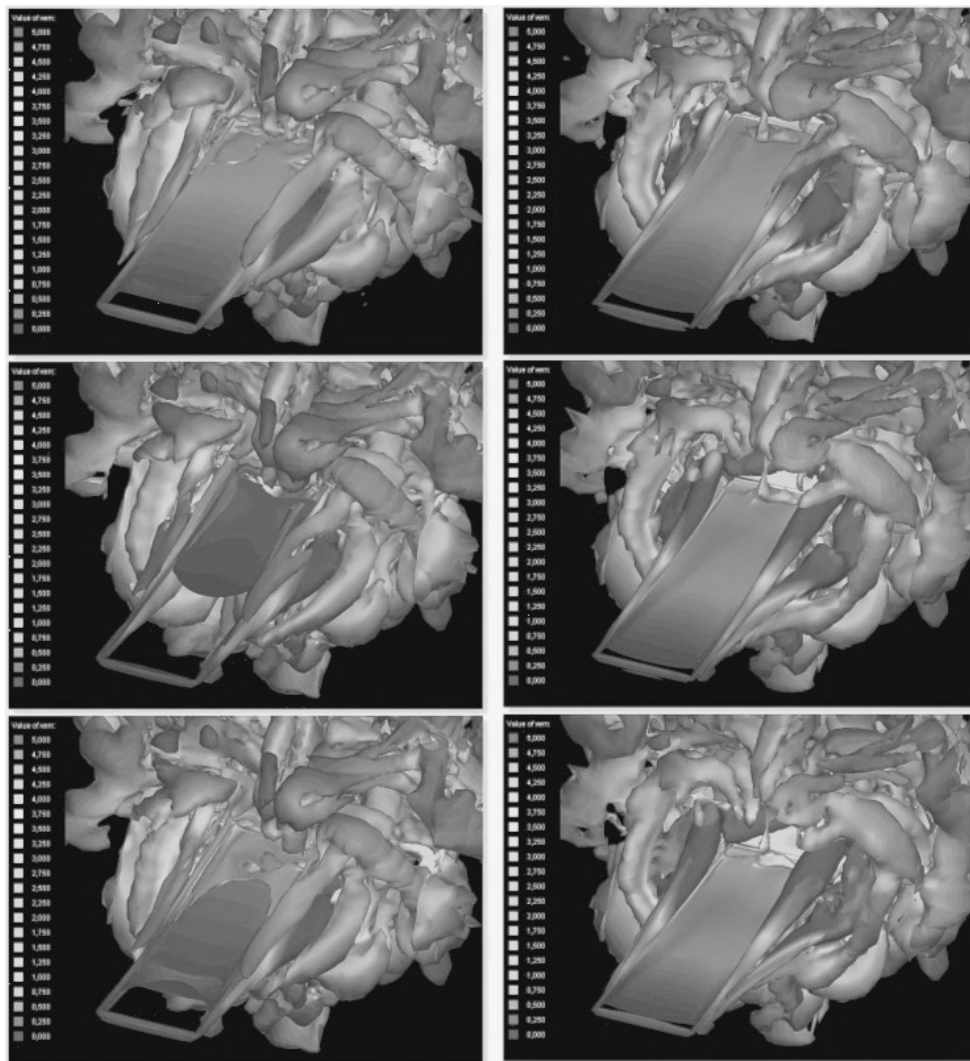


Рис. 4. Временные фреймы вихреобразования вокруг вибрирующей пластины, отражаемого через изоповерхность Q-критерия ( $Q=0.05$ )

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

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. D. Zaitsev, N. Schur, E. Smirnov, V. Goryachev. Visual analysis of turbulent whirl over a cantilevered flexible blade after 3D numerical simulation // Proc. of the ISFV13 - 13<sup>th</sup> International Symposium on Flow Visualization, July 1-4, 2008, Nice, France, Report 109, 10 p.
3. Hunt J., Wray A., Moin P. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows, Center for Turbulent Research Report CTR-S88, 1988, pp. 193-208.