

# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ

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

Визуализация в вычислительной гидродинамике – заключительный этап моделирования, необходимый для анализа структуры течений, выяснения механизмов процессов переноса в газовых и жидкостных потоках. Численное решение нестационарных задач для турбулентных и высокоскоростных течений производится, как правило, с применением методов распараллеливания. Вычислительный процесс занимает значительное время, в процессе расчета порождается большой объем информации о полях скорости, давления и энергии, о распределении характеристик переносимых величин, динамично изменяющихся во времени. Инструментарий для графической обработки данных в программах визуализации активно модернизируется и совершенствуется в соответствии с увеличивающейся мощностью решателей.

Качество визуализации рассчитанных полей течений в современных программах графической обработки высокое. Совершенствование методов пространственного и поверхностного рендеринга объектов сцен движения жидкости и газа ведется традиционно в направлении генерации почти “реальных” объектов, имеющих, однако, нефизическое абстрактное представление. Известные опробованные методы графического представления моделируемых течений развивались на базе опыта экспериментального наблюдения движения жидкости или газа, визуализируемых за счет введения красящих добавок или механических включений в движущую среду, с использованием оптических методов наблюдения. Применялись традиционные способы построения линий тока и траекторий отмеченных частиц, приемы специальной фототехники для выделения зон резкого изменения давления в заданных областях течений. В современных приборах с PIV ([Particle Image Velocimetry](#)) технологией обработка результатов лазерной анемометрии потоков ведется с последовательным расчетом векторных величин: с представлением тех же линий тока и векторов – отрезков траекторий частиц за небольшой отрезок времени. Программная техника визуализации позволяет создавать цветные картины полей течений с разными палитрами и имитацией прозрачности выделенных абстрактных объектов – скалярных и векторных символов, с достаточной выразительностью и (если удастся) экспрессией. Аббревиатуру “CFD - Computational Fluid Dynamics” часто (с некоторой долей иронии) читают как “Color Fluid Dynamics”, подчеркивая установившуюся практику визуализации результатов расчетов через показ окрашенных объектов. Представление течений в вычислительной гидродинамике в духе гиперреализма изображений – достаточно обработанный прием техники визуализации течений. Традиционное использование цветных карт с переменными палитрами дает возможность быстро ориентироваться в структуре моделируемого течения при анализе расчетов [1].

Для иллюстрационных целей предлагается проводить визуализацию временных состояний отдельных объектов визуализации с использованием объемного рендеринга и сложного наложения слоев изоповерхностей разной прозрачности и освещенности, с выделением границ структур и применением различных оптических эффектов изменения интенсивности освещения [2]. Намечается определенный возврат к визуальному представлению пространственных жидкостных объектов на основе чисто графической техники, с имитацией карандашного наброска или его акварельного исполнения. Есть опыты использования техники офорта: в манере меццо-тинто или акватинты, с имитацией травления граверных досок. Для повышения доходчивости представления подвижных, изменчивых, структур течений используется манера традиционных рисунков и иллюстраций как последовательности выделенных объектов, вынесенных со сдвигом на одно изобразительное поле. В таком представлении подчеркиваются особенности вихревого движения жидкости - через частоту штриховки и стиля её нанесения. В большинстве постпроцессоров коммерческих CFD-систем используются привычные приемы “реалистичной” визуализации. Использование специальных графических приемов для “нереалистичного” выделения особенностей течений предлагается в ряде новых систем визуализации, среди которых можно выделить работы лаборатории VIDI (Visualization and Interface Design Innovation) в DOE SciDAC Institute for Ultra-Scale Visualization (University of California-Davis) [2,3]. Это добавочное функциональное дополнение к известным приемам визуализации и некоторое изменение графического стиля кажется перспективным, особенно при рассмотрении нестационарных турбулентных течений. В частности повышение уровня понимания пространственных и временных структур проявляется за счет повышения артистической выразительности иллюстраций.

В разрабатываемой графической системе HDVIS (High Definition VISualization) обработку первичных гидродинамических полей для нестационарных течений выполняют на множестве эволюционирующих во времени данных, получаемых с сервера вычислительного кластера или многопроцессорной ЭВМ. На их основе строится и корректируется сцена визуализации: с выбором видов, сечений и выделенных областей анализа, с построением карт распределения векторных и скалярных полей, с генерацией изоповерхностей, отображением линий тока или линий отмеченных частиц. Важным этапом анализа является расчет производных скалярных и векторных полей, тензорных величин. Эти операции ведутся с использованием встроенного в систему

калькулятора, с дополнительной обработкой и связыванием новых производных величин, с иконографическим выделением особенностей течений. Автоматизация визуальной обработки позволяет монтировать представительный набор изображений, создавать законченные иллюстрации и анимационные ролики, комфортно вести сравнительный графический анализ результатов. При обработке полей течений в HDVIS используется практически весь набор графического описания распределенных величин, от построения облачного изображения изоповерхностей скалярных полей до имитации движения пленок по несущим поверхностям в задачах внешней аэродинамики. Такое представление не только повторяет используемую в аэродинамическом эксперименте технику визуализации течений, но, с добавлением функций фильтрации, позволяет эффективно вести поиск первоначально скрытых, затененных деталями, выделяющихся особенностями зон.

Выявление вихревых структур ведется различными методами, в частности для этих целей используются расчеты градиентов основных и производных скалярных полей. Определяют ротацию скоростных полей, ведут расчет нормированной спиральности - скалярного произведения векторов скорости и завихренности. Идентификацию вихрей проводят по признаку распределения значений этой величины в области формирования вихревой линии. Для выявления таких структур ведется поиск областей с пониженным давлением. Часто используется  $\lambda$ - критерий вихревого усиления или Q-критерий: инвариант тензора градиентов скорости. Последняя величина часто применяется для выделения областей, где вихрь доминирует над вязким сдвигом. Используются и другие комбинированные методы. На основе вторичных полей создаются геометрические объекты (изоповерхности, связанные с другими векторными и скалярными величинами), дающее представление о вихревой структуре течений. Для анализа сжимаемых течений эффективна генерация численных шпирен-фотографий (показ плоских и поверхностных карт для распределения нелинейных функций модуля градиента плотности). В совокупности эти способы позволяют выявить характерные детали течения (ударные волны, волны разрежения, контактные разрывы).

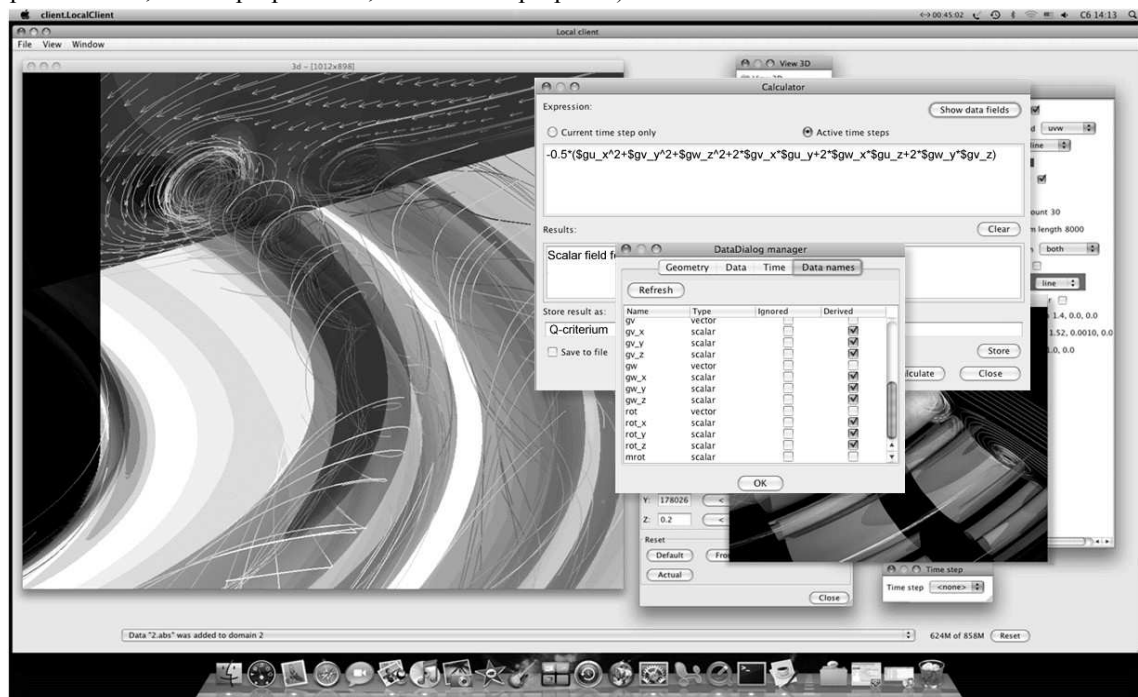


Рис. 1. Интерфейс HDVIS с окнами управления и изображения объектов визуализации течений

Система HDVIS выполнена в виде JAVA-приложения для работы в различных операционных системах. Интерфейс программы (Mac OS Snow Leopard) показан на рис. 1.

Система используется для обработки результатов моделирования, полученных с использованием кода SINP [4] и комплекса вычислительных программ лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН, а также применяется рядом сторонних исследователей в области вычислительной гидродинамики. В качестве примера использования основных и добавочных функций системы ниже приводятся изображения, полученные при анализе решения ряда задач аэро- и газодинамики.

Примером визуализации результатов расчета гиперзвукового течения могут служить иллюстрации, полученные при анализе задачи, в которой моделировался нестационарный процесс взаимодействия трехмерных ударно-волновых конфигураций регулярного (RR) и маховского (MR) отражения с возмущениями, искусственно вводимыми в набегающий поток (от энергии сфокусированного лазерного импульса). В [4] был проведен расчет трехмерного отражения скачков на плоскости симметрии между двумя пластинами конечного размаха. Моделирование велось путем численного решения трехмерных нестационарных уравнений Эйлера с помощью схемы сквозного счета на основе MUSCL TVD - реконструкции высокого порядка точности и

использования алгоритма HLLC для приближенного решения задачи Римана. Расчеты начинались с начальными данными в виде установившегося гиперзвукового течения со стационарным регулярным отражением. Для получения маховского отражения регулярное отражение подвергалось воздействию от возмущения плотности. Вычисления продолжались до установления стационарной маховской конфигурации. В расчетах использовалась структурированная сетка с числом ячеек до 120 миллионов, что было необходимо для адекватного разрешения деталей течения во всей расчетной области, включая фокальный объем и область взаимодействия ударных волн. Численные расчеты проводились на параллельном компьютере, где использовались до 64 процессоров.

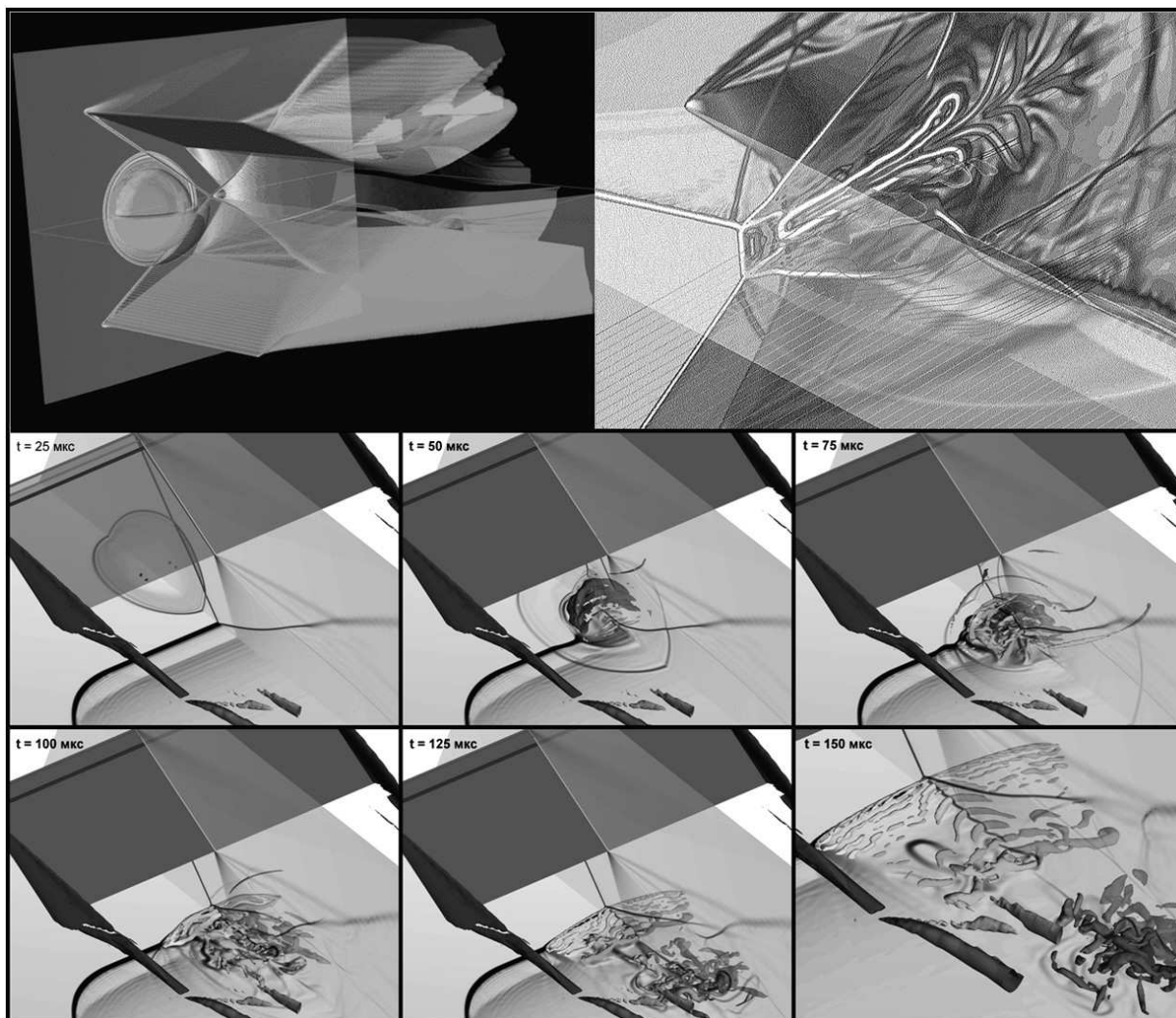


Рис. 2. Фазы гиперзвукового течения и взаимодействия ударно-волновых конфигураций

Мгновенное выделение энергии в поток вызывает сильный нагрев газа в заданной области, и соответственно резкое увеличение давления, которое сопровождается образованием взрывной волны. В последующие моменты времени, взрывная волна и тепловое пятно взаимодействуют с регулярной конфигурацией скачков. Когда возмущение достигает области отражения скачка, регулярная конфигурация полностью разрушается с образованием сложных ударно-волновых и вихревых структур. Вблизи плоскости симметрии образуется искривленный дугообразный скачок, за которым формируется замкнутая дозвуковая область. Эта конфигурация постепенно трансформируется в маховское отражение скачка.

Процесс взаимодействия возмущения с потоком газа иллюстрируется на рис. 2, где представлены различные фазы развития течения. Вверху слева показан момент формирования взрывного возмущения от подвода тепловой энергии с видимой точкой регулярного отражения установившейся ударной волны. На рисунке справа дается изображение фрагмента течения после прохождения взрывной волны через эту точку, с возникшей поверхностью уже сформированного маховского скачка. Ниже показаны этапы развития возмущения в зонах контакта, с выделением вихрей в зоне прогрессирующего распада вихревой структуры в дозвуковой области за сформированным маховским скачком. Изображения численного шлирена в центральной и горизонтальной плоскости симметрии совмещены с изоповерхностями ударной волны ( $M = 1.1$ ) и изоповерхностями  $Q$ -критерия ( $Q = 5$ ), с добавленной поверхностной картой локального распределения числа Маха. Образовавшиеся вихревые структуры в дозвуковой области изображены в комбинации с линиями тока, сходящими с пластин.

Представленная сложная сцена в цветовом представлении воспринимается в целом, хотя она достаточно сложна и насыщена деталями. Для усиления информативности при подготовке черно-белой иллюстрации, проведена растеризация изображения с использованием алгоритма “Floyd Steinberg dithering”, графическими методами выделены особенности течения, что качественно переводит изображение (на верхних рисунках) в разряд “нереалистичных” – выполненного в стиле технического рисунка. Нижние рисунки приводятся в серой палитре “реалистичного” вида, для их восприятия требуются качественное полиграфическое воспроизведение.

Другим примером создания набросков развития вихревых структур могут служить результаты визуализации расчета нестационарных течений в подогреваемой замкнутой каверне кубической формы, развития турбулентного течения над открытой сверху каверной с подогреваемым дном, формирования осциллирующего течения за нагретым цилиндром [6,7].

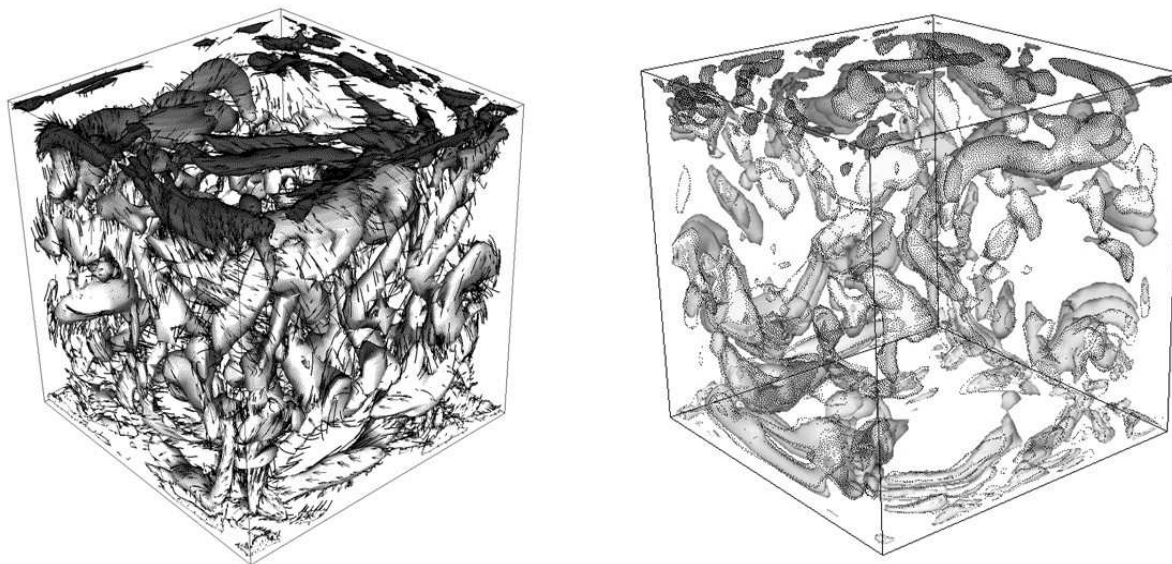


Рис. 3. Стилизованное изображение распределения вихрей при турбулентной конвекции в замкнутой подогреваемой снизу полости в динамике развития течения

Пример визуализации турбулентного конвективного течения воды в замкнутой полости кубической формы с подогреваемым дном показан на рис. 3. Изображены формируемые в процессе перемешивания, всплывающие вверх термики и опускающиеся вниз встречные вихри. Визуальное представление течения достаточно сложно из-за большого диапазона вихревых масштабов течения, удобных для графического анализа. Вихревая структура течения на рисунке слева стилизована сочетанием вихрей ( $Q = 1$ ) и коротких участков линий тока, проходящих через точки на поверхностях вихрей и указывающих направление их движения в динамике.

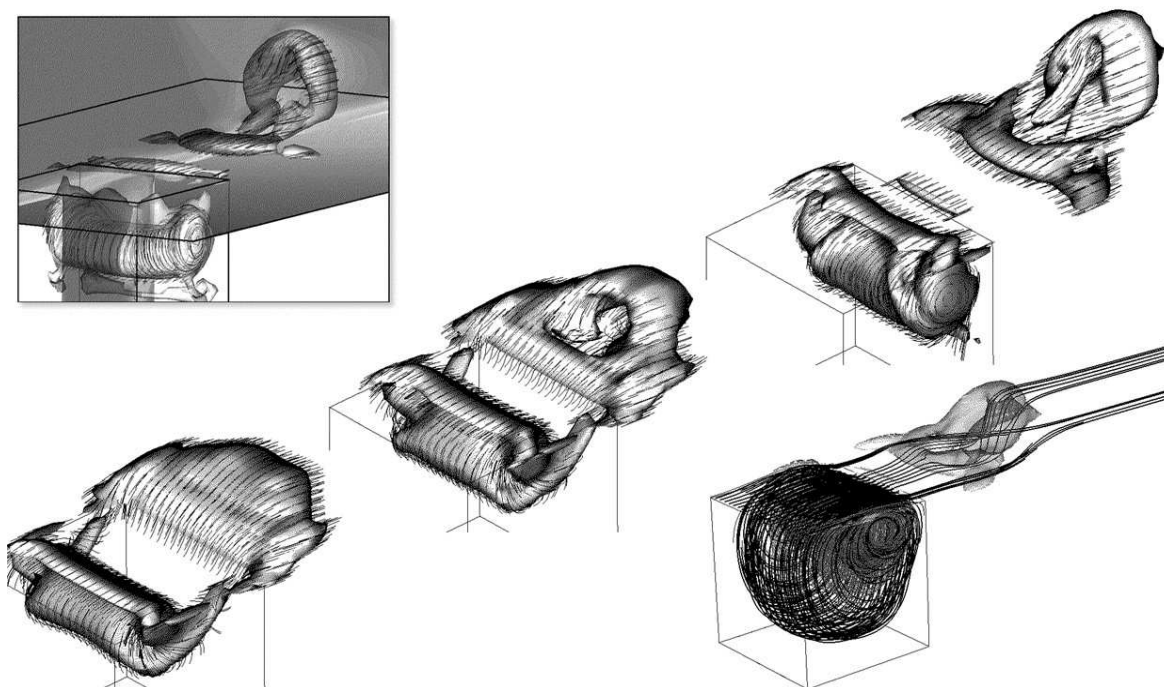


Рис. 4. Формирование гарпуноподобного вихря в пограничном слое турбулентного течения

Общее движение воспринимается наблюдателем только в анимационном ролике. Характерно образование конвективного вихря крюкообразной формы в ближайшем углу полости. Глобальная циркуляция течения формируется в зоне диагонального сечения куба. Моделируемое течение имеет высокочастотные осцилляции, представление о которых “в статике” может дать метод совмещения объектов на трех временных слоях в одной усредненной сцене, как это показано на рисунке справа. Стилем визуализации предполагается сочетание полупрозрачных тонированных поверхностей вихреобразований в одной интегральной композиции.

Для усиления представления о динамике развития отдельной вихревой структуры используется метод пошагового развертывания сцены формирования на одном рисунке со штриховым графическим исполнением. Это иллюстрируется на рис. 4., где на начальном этапе развития течения выделяются четко различимые вихри (генерируемые за счет тепловой конвекции в открытой сверху камере), сносимые внешним потоком. Применяемый стиль такого представления давно технически освоен в иллюстрациях динамически развиваемых физических опытов. Для представления разных фаз движения для более сложных объектов на одной иллюстрации возможно сочетание отмеченных выше приемов (рис. 5).

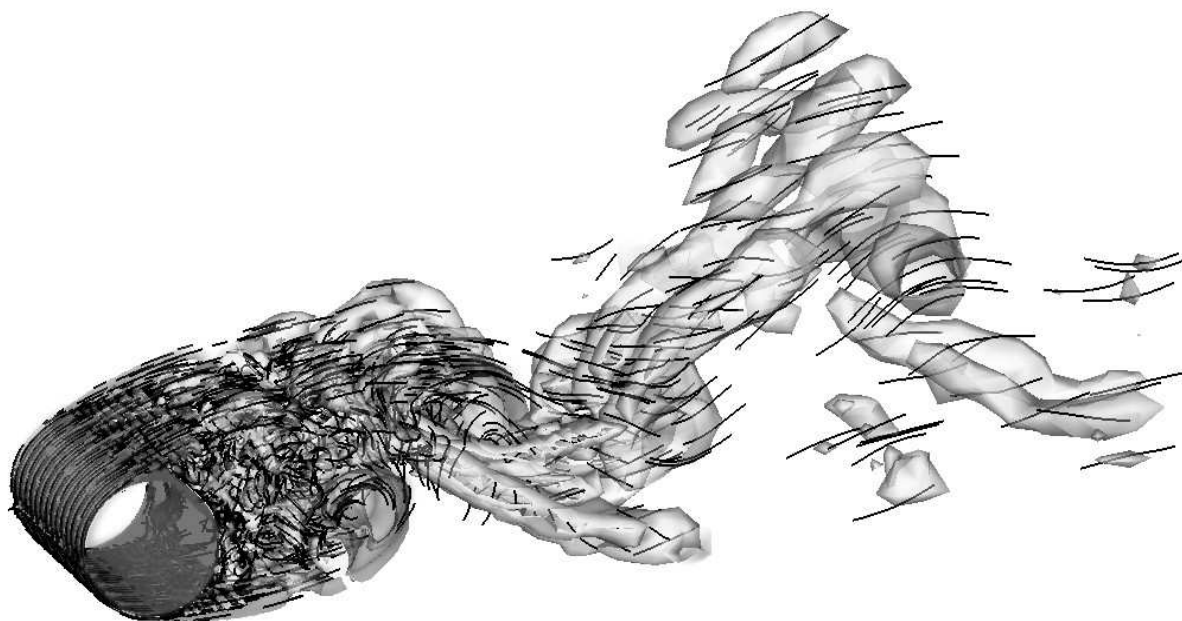


Рис. 5. Выделение продольных и поперечных вихрей за нагреваемым цилиндром

Пример визуализации подковообразных вихревых структур, образующихся при обтекании лопатки, установленной на плоское основание [7] дается на рис. 1. Здесь приведены окна с изображением вихрей ( $Q = 2 - 9$ ) в комбинации с проходящими через них линиями тока и картой распределения числа Стентона на плоскости у корня лопатки. Приведенные сцены были обработаны как последовательность кадров анимации, использованной для подробного анализ формирования этих структур.

Комбинационный подход к созданию иллюстраций в вычислительной гидродинамике с привлечением методов, разработанных в традиционной иллюстративной графике, обладает большим потенциалом для придания графической выразительности сцен визуализации.

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

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. M. Jiang, R. Machiraju, D. Thompson, The visualization handbook (14. Detection and visualization of vortices) // Ed. by C.D. Hansen, C.R. Johnson, Elsevier Inc., 2005, pp. 295-309
2. J.-P. Balabanian, I. Viola, T. Mooller, and E. Grooller. Temporal styles for time-varying volume data // In S. Gumhold, J. Kosecka, and Wei-Hsien Hsu et al., O. Staadt, ed., Proceedings of 3DPVT'08 - the Fourth International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, June, 2008, p. 81- 89
3. W.-H. Hsu, J. Mei, C. Correa, and Kwan-Liu Ma. Depicting Time Evolving Flow with Illustrative Visualization Techniques // In Proceedings of International Conference on Arts & Technology (ArtsIT 2009), September, 2009, pp. 1-12
4. Иванов М.С., Кудрявцев А.Н., Хотяновский Д.В. Влияние локализованного импульсного энергоподвода на регулярное и маховское отражение скачков // Успехи механики сплошных сред. Сб. научных трудов, посвященных 70-летию академика В.А. Левина, Владивосток, 2009, С. 1-10
5. Goryachev V., Balashov M. Simulation of vortex transformation in cavities and induced structures in vortex chambers // EUROMECH Colloquium 491. Vortex dynamics from quantum to geophysical scales, 11 - 14 September 2007, University of Exeter, Exeter, UK, pp. 41-42

6. 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
7. Levchenya A.M., Smirnov E.M, Goryachev V.D. RANS-based numerical simulation and visualization of the horseshow vortex system in the leading-edge endwall region of the symmetric body // Conf. proc. of the 14th Event of international Conference Series on Fluid Flow Technologies Held in Budapest, Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'09), The 14th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, September 9-12, 2009, pp. 315-322