10-я Международная конференция

Графикон-2000

Круглый стол

«Применение методов научной визуализации в прикладных задачах»

Вступительное слово сопредседателя круглого стола А.Е.Бондарева

(*ИПМ им. М. В. Келдыша РАН*)

Уважаемые коллеги!

Мы собрались здесь сегодня для того, чтобы своим присутствием подтвердить факт значимости научной визуализации в численном моделировании прикладных задач различных областей:

- Применение методов научной визуализации в задачах прикладной газовой динамики;
- Потенциальные возможности подходов научной визуализации в задачах аварийной защиты ядерных реакторов;
- Проблемы научной визуализации в современных задачах внешнего обтекания летательных аппаратов;
- Применение научной визуализации в задачах оптимизации и управления процессами тепло-массопереноса;
- Научная визуализация и современные вычисления;
- Научная визуализация задач вычислительной аэрогазодинамики через сеть Интернет.

Среди собравшихся мне приятно видеть представителей своей специальности, бывших и настоящих соратников, тесно связанных с решением производственных задач, и занятых разработками последних новаций.

Но с еще большим чувством я рад встрече со специалистами иных областей прикладных наук, руководителями действующих производственных подразделений, исследователей, определяющих точку зрения на эффективность научной визуализации как отдельного полноправного инструмента анализа решения.

А также всех иногородних коллег, не пожалевших отпускного времени ради посещения этого мероприятия.

В своем вступительном слове, я не хотел бы занимать внимание собравшихся обсуждением проблем, связанных с малой интеграцией между исследователями прикладных задач и специалистами визуализации, тем более что картина может оказаться неоднородной, и не все зависит от желания людей, а скорее от финансирования такого сотрудничества.

Но на чем бы я позволил себе сосредоточить ваше внимание, так это на ряде проблем, стоящих перед специалистами в области НВ на современном этапе развития такого необходимого сегодня союза.

Первой насущной проблемой, как ни странно это прозвучит, является отсутствие какой-либо описательной системы ориентирующей среди многочисленных методов визуализации, и графических пакетов, заявляемых, как правило, как универсальные и лучшие.

Второй проблемой является навязываемая исследователю исключительно вспомогательная иллюстративная функция научной визуализации, как будто бы решение прикладных задач сводится исключительно к поиску априорно известных результатов.

Третьей проблемой является различная точка зрения на одни и те же данные у специалистов в области решения прикладных задач и у разработчиков средств визуального представления этих данных.

Это далеко не полный перечень, но я думаю, что список пополнят выступающие.

С другой стороны трудно переоценить значимость визуализации в численном моделировании. НВ за годы своего существования не раз становилась переводчиком наукоемкого изложения в лаконичных образах, доступных человеческому глазу.

Возможно, скоро НВ станет единственным самым скоростным источником обмена информацией между исследователями одной области знания, между смежными областями, между специалистами и людьми, менее искушенными в науке, но распоряжающимися финансами.

Научная визуализация численного расчета – есть выставочный экспонат коллективной интеллектуальной стоимости осуществленной работы.

Основной тезис, предлагаемый к обсуждению на нашем круглом столе:

«Научная визуализация - не только средство иллюстрации, но основной и зачастую единственный инструмент анализа научного результата».

Сегодня мы говорим о проблемах визуализации. Надеюсь, что наша встреча будет достойна потраченного времени.

Вступительное слово председателя программного комитета международной конференции ГРАФИКОН-2000 С.В.Клименко

(*Институт Физики Высоких Энергий*)

Я приветствую всех собравшихся на этот круглый стол от имени оргкомитета 10-й международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению ГРАФИКОН-2000. Должен сказать, что наша конференция в начале 90-х годов называлась международной конференцией по компьютерной графике и визуализации. Этому были посвящены многие доклады и секции. Позже название изменилось. Но следует заметить, что все начиналось с проблемы визуального представления научных данных и результатов расчетов.

Эта проблема была сформулирована на дискуссии в 1987 году, которая состоялась в феврале, я точно не помню. Эта дискуссия была собрана по инициативе ACM SIGGRAPH IEEE Computer Society Technical Committee of Computer Graphics. На этой дискуссии собрались люди и они сформулировали основные задачи этой новой науки, которая возникла в

связи с тем, что в Штатах тогда начали довольно мощно использовать суперкомпьютеры и они поняли, что то количество цифр и чисел, которое выдают суперкомпьютеры невозможно переварить без использования каких-то новых методов, новых технологий, новых средств. Собственно тогда говорилось, что суперкомпьютеры выдают числа как из пожарного шланга, поэтому нужны какие-то нетривиальные подходы, чтобы все это переваривать. Эта дискуссия была сформулирована в специальном выпуске ACM SIGGRAPH.

Уже в 1990 году в Штатах собралась международная конференция, которая проводится под эгидой IEEE Computer Society Technical Committee of Computer Graphics. Мне повезло быть на этой первой конференции, потом в течение 10 лет я непрерывно посещал эти конференции и являюсь там членом программного комитета.

Конечно, их возможности с нами не сравнить. Сейчас в визуализацию в науке и индустрии вкладывается порядка 7 миллиардов долларов – это сравнимо с бюджетом всего нашего министерства обороны. Естественно, нам очень трудно с ними соревноваться, но зато, как говорят, у них есть деньги – у нас есть мозги, поэтому можно поспорить. В этом плане мы довольно активно работаем. Хотя многим нашим сотрудникам, работающим в этой области, приходится работать за рубежом, но они держат тесную связь с нами, публикуются в наших журналах, приезжают к нам на конференции. Поэтому я считаю, что нам надо возродить это научное направление, и даже предлагаю, может быть, на базе Протвино в следующем году собрать первую всероссийскую конференцию по научной визуализации.

Я очень рад, что Вы здесь собрались. Я рад Вас приветствовать, и думаю, что у нас будет плодотворная дискуссия. Может быть, мы здесь посмотрим какие-то новые задачи, которые можно решать с помощью научной визуализации. Я напомню, что на самом деле с помощью научной визуализации примерно 10 лет назад, может быть немного больше, были решены очень серьезные задачи в области теории чисел. Александр Зенкин получил очень серьезные результаты, на которых он впоследствии защитил докторскую диссертацию. Просто он использовал тривиальные, но именно визуальные методы. У нас была большая когорта людей, приглашенных по научной визуализации в 1994 году на Графикон в Нижнем Новгороде. Там был один из выдающихся людей – Стив Брайсон, который первым сделал виртуальную аэродинамическую трубу.

Спасибо Вам за внимание.

Вступительное слово сопредседателя круглого стола И.Н.Иновенкова
(*ВМК МГУ*)

Разрешите поприветствовать Вас от имени преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов факультета вычислительной математики и кибернетики, на заседании, посвященном применению методов визуализации в математическом моделировании. Я хотел бы добавить несколько слов. Я считаю, что мы находимся в стадии становления новой парадигмы – парадигмы использования визуализации как инструмента, не как иллюстративного средства, а как инструмента исследования. Поскольку я являюсь специалистом в области математического моделирования плазмы, то там это становится все более и более актуальным.

Сейчас очевидно, что для качественного и конкурентоспособного исследования в области математического моделирования необходимо в команде исследователей иметь специалиста по визуализации, так же как и специалиста в области параллельных вычислений. В общем-то, более или менее ясно, что собственно математическое моделирование и визуализация начинают несколько расходиться. В визуализации возникают собственные предметы исследования, собственные задачи, собственные средства.

Я думаю, что вот этот круглый стол, который собирает специалистов в области использования визуализации в задачах математического моделирования, послужит первым толчком для активизации работы российского сообщества в области визуализации. Я думаю, как и С.В.Клименко, что конференция это очень хорошо. Конечно, идеально было бы иметь журнал, но для начала есть смысл сделать сборник с цветными иллюстрациями, соответствующий по уровню известным трудам американской конференции Scientific Visualization. Это все, что я хотел вам сказать.

Напомню вам, что 50 лет тому назад Джон фон Нейман заявил, что развитие вычислений позволит улучшить понимание решений нелинейных уравнений в частных производных, особенно это касается динамики жидкости. Сейчас сделать прогноз о том, через сколько лет визуализация станет общепринятым методом познания трудно, но я думаю, что это займет не более 10-15 лет. Давайте работать, чтобы это время пришло как можно быстрее.

Выступление А.К. Алексеева

РКК «Энергия», г.Королев

Выступая перед этой аудиторией, как представитель КБ, я могу сказать, что результаты вычислительной газовой динамики, представленные визуально, являются для нас практиков столь красивыми, столь впечатляющими, что не возникает никаких вопросов о необходимости визуального представления данных математического моделирования физических процессов. Одновременно с этим за бортом остается вопрос: что же именно нужно представлять визуально, что наиболее необходимо для практики?

Когда к нам приходят специалисты в области вычислительной газовой динамики и предлагают комплексы программ для расчета поля течения и средства визуального представления этих полей, то общение напоминает визит фотографа в глухую деревню. Мы восхищаемся представленными полями скоростей, распределениями температуры, плотности, давления. Но на практике эти красивые изображения мы можем лишь повесить на стенку, чтобы любоваться. Для решения практических конструкторских задач нам недостаточно моделировать и визуализировать поле течения, нам недостаточно знать поле скоростей и распределения давления и т.д. На практике нас интересуют конкретные параметры для исследуемого класса задач, определяемого конструкторской целью. Нам необходимо визуальное представление именно этих параметров и прослеживание их изменений в зависимости от вариации тех или иных условий обтекания. Это можно сжато сформулировать следующим образом.

Программы вычислительной гидро-газодинамики (3D+1) и соответствующие программы визуализации дают информацию, которая с точки зрения ее практического использования является с одной стороны сверхизбыточной, с другой стороны - недостаточной. Практическая задача содержит кроме модели течения еще некоторую цель и некоторые управляющие параметры. Практик не может напрямую использовать поле течения, ему нужны рекомендации на языке других специалистов (проектантов, конструкторов и т.д.) по выбору каких-то вариантов из множества допустимых. Это может быть выбор геометрической формы (минимальное сопротивление), выбор управления течением (максимальное смешение) и т.д. В задачах идентификации, по измерениям в поле выбираются коэффициенты, источниковые члены, граничные/начальные условия и т.д.

Во многих случаях эти задачи можно поставить в оптимизационном виде. В этом случае решение газодинамической задачи является элементом решения более общей, оптимизационной задачи, содержащей кроме параметров течения еще и сопряженные параметры. Визуализация сопряженных параметров (параллельно с визуализацией течения) позволяет

получать полную информацию о задаче (включая влияние цели и управляющих параметров). Пример подобного подхода содержится в следующем докладе.

О визуализации сопряженных полей при идентификации и управлении трехмерным течением вязкой жидкости

Алексеев А. К.*, Бондарев А.Е**., Молотилин Ю.А.*
**РКК Энергия, Королев*
***ИПМ им.М.В.Келдыша РАН*

Введение

При решении задач идентификации и управления течением жидкости, сформулированных в оптимизационной постановке, единственным практически доступным способом определения чувствительности целевого функционала к управляющим параметрам является решение сопряженных уравнений [1,2,5]. Эти уравнения описывают поля сопряженных параметров, являющихся некоторыми аналогами (точнее, дуальными величинами) параметров течения. Сопряженные параметры в определенном смысле описывают распространение информации при решении обратных задач в оптимизационной постановке. Сопряженные параметры зависят от вида прямой задачи (уравнений и соответствующего поля течения) и целевой функции. В зависимости от вида управляющих параметров, градиент целевого функционала зависит от различных функций от сопряженных параметров.

Визуализация сопряженных параметров может быть особенно ценной из-за непрозрачности их физического смысла и отсутствия соответствующих интуитивных представлений. Для демонстрации использования сопряженных параметров рассмотрим обратные задачи для трехмерного ламинарного течения газа, описываемого уравнениями Навье-Стокса в приближении Буссинеска [3,4]:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_k \frac{\partial U_i}{\partial X_k} + \frac{\partial P}{\partial X_i} - Gr^{-0.5} \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_k \partial X_k} - T\delta_{3,i} = 0 \\
&\frac{\partial U_k}{\partial X_k} = 0 \\
&\frac{\partial T}{\partial t} + U_k \frac{\partial T}{\partial X_k} - \mathrm{Pr}^{-1} Gr^{-0.5} \frac{\partial^2 T}{\partial X_k \partial X_k} + Q(X,Y,Z) = 0
\end{aligned} \qquad (1)$$

$U\big|_{t=0} = 0;\ T_{t=0} = T_0;$ в Ω (Ω-параллелепипед), $U\big|_{\Gamma} = 0;\ T\big|_{\Gamma} = T_w(X_i);$ Γ - граница

Задача идентификации течения: определить распределение температуры на границе $T_w(X,Y,0)$ (или тепловой источник $Q(X,Y,Z)$), используя в качестве исходных данных измерения компонент скорости $f^{exp}(X_m,Y_m,Z_m)$.

Задача управления течением определить распределение температуры на границе $T_w(X,Y,0)$ (или источники тепла $Q(X,Y,Z)$), которое позволяет создать необходимое поле скоростей $f^{exp}(X_m, Y_m, Z_m)$.

Для решения этих задач необходимо минимизировать целевой функционал

$$\varepsilon = \int_{\Omega,t} \left(f(t, X_m, Y_m, Z_m) - f^{\exp}(X_m, Y_m, Z_m) \right)^2 \delta(X - X_m)\delta(Y - Y_m)\delta(Z - Z_m) d\Omega dt \tag{2}$$

невязку между расчетными и целевыми (экспериментальными) величинами $f^{exp}(X_m, Y_m, Z_m)$. Для этого может быть очень полезен градиент функционала. Так как число управляющих параметров может быть очень велико (порядка числа узлов в поле), то, единственным быстрым способом расчета градиента (не зависящим от числа управляющих параметров) является решение сопряженной задачи [1,2,4]. К тому же, одно и то же поле сопряженных параметров может быть использовано для большого набора управляющих параметров (как граничных, так и объемных). Для формулирования сопряженной задачи объединим целевой функционал и слабую постановку прямой задачи в Лагранжиан.

$$\begin{aligned} L() = \varepsilon() + \int_{t,\Omega} \frac{\partial U_k}{\partial X_k} \Psi_p \, dt \, d\Omega + \\ + \int_{t,\Omega} \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_k \frac{\partial U_i}{\partial X_k} + \frac{\partial P}{\partial X_i} - Gr^{-0.5} \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_k \partial X_k} - T\delta_{3,i} \right) \Psi_i dt d\Omega + \\ + \int_{t,\Omega} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_k \frac{\partial T}{\partial X_k} - \Pr^{-1} Gr^{-0.5} \frac{\partial^2 T}{\partial X_k \partial X_k} \right) \Psi_T dt d\Omega \end{aligned} \tag{3}$$

Будем считать, что сопряженные величины (множители Лагранжа) $\Psi_p, \Psi_i, \Psi_T \in H^{1,2}(\Omega)$, $(\Psi_i = \Psi_u, \Psi_v, \Psi_w)$, $H^{1,2}(\Omega)$ - Гильбертово пространство функций, имеющих суммируемые обобщенные производные первого по времени и второго по пространству порядка.

Сопряженная система

Сопряженная система, как правило, формулируется, как условие, при котором приращение Лагранжиана выражается через вариацию управляющих параметров так, чтобы, остальные члены первого порядка были равны нолю. Это дает возможность получить градиент невязки и, соответственно, необходимое условие минимума.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi_i}{\partial t} + \frac{\partial (U_k \Psi_i)}{\partial X_k} + \frac{\partial \Psi_p}{\partial X_i} + Gr^{-0.5} \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial X_k \partial X_k} - \Psi_i \frac{\partial U_i}{\partial X_k} - \frac{\partial T}{\partial X_i} \Psi_T + \\ + 2\left(U_i(t,X,Y,Z) - U_i^{\exp}(X,Y,Z) \right) \delta(X - X_m)\delta(Y - Y_m)\delta(Z - Z_m) = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Psi_k}{\partial X_k} = 0$$
$$\frac{\partial \Psi_T}{\partial t} + \frac{\partial (\Psi_T U_k)}{\partial X_k} + \mathrm{Pr}^{-1} Gr^{-0.5} \frac{\partial^2 \Psi_T}{\partial X_k \partial X_k} - \Psi_W = 0 \qquad (5)$$

Начальные и граничные условия

$\Psi_i\big|_{t=t_f} = 0;\ \Psi_T\big|_{t=t_f} = 0;$ в Ω, $\Psi_i\big|_\Gamma = 0;\ \Psi_T\big|_\Gamma = 0;$

В отличие от прямой задачи начальные условия соответствуют концу временного интервала и эволюция течения по времени идет вспять.

Если мы управляем течением с помощью температуры стенки $T_w(X,Y,0)$, то на решении этой системы вариация невязки записывается в виде:

$$\Delta L(T_w(X,Y,0)) = \mathrm{Pr}^{-1} Gr^{-0.5} \int_t \int_{X,Y} \frac{\partial \Psi_T}{\partial Z} \Delta T_w(X,Y,0) dX dY dt \qquad (6)$$

отсюда определяем градиент невязки через градиент сопряженной температуры:

$$grad(\varepsilon(T_w(X,Y,0))) = \mathrm{Pr}^{-1} Gr^{-0.5} \int_t \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Psi_T(t,X,Y,0)\right) dt \qquad (7)$$

Если мы управляем течением с помощью распределенных источников тепла $Q(X,Y,Z)$, то

$$grad\,(\varepsilon(Q(X,Y,Z))) = \int_t \left(\Psi_T(t,X,Y,Z)\right) dt \qquad (8)$$

Градиент функционала указывает на направление продвижения к минимуму, там, где он мал по амплитуде, там влияние управления на целевой функционал мало, и наоборот.

Численные эксперименты

Поле течения рассчитывается с помощью конечно-разностной аппроксимации уравнений Навье-Стокса первого порядка точности по времени и второго по пространственным координатам (сетка равномерная). Используется схема расщепления. Вначале рассчитывается промежуточное поле скоростей, далее решается уравнение Пуассона с помощью установления, (полунеявная схема переменных направлений, реализованная трехточечной прогонкой). На третьем шаге поле скоростей подправляется в соответствии с полученным полем давления для выполнения условия неразрывности.

При решении сопряженной задачи используется тот же конечно-разностный алгоритм, что и для решения прямой задачи, но установление по времени проводится в обратном направлении, начиная с $t=T$. Параметры течения, входящие в коэффициенты берутся из решения прямой задачи.

В данной работе численные эксперименты проводились для стационарных целей и стационарного управления. В качестве целевой функции рассмотрено распределение одной из компонент скорости *W(X,Y,Z),* полученное предварительным расчетом при нагреве нижней границы. Представлены расчеты поля течения для $Ra=10^6$, сетка 20*25*25 (рис 1,2). Рассчитано соответствующее поле сопряженных параметров, на рис. 3 представлена весовая функция для управления источниками тепла, на рис. 4 для управления температурой. Поле сопряженных параметров использовано для определения температуры стенки по измерениям скорости с помощью метода наискорейшего спуска. Результат расчета температуры стенки представлен на рис. 5, истинное распределение – на рис. 6. Рис. 7 демонстрирует возможность сравнения двух точки измерения (0.6,0.2,0.8) и (0.6,0.6,0.8) с точки зрения их влияния на сопряженное поле, измерения во второй точке существенно информативней, так как она находится в восходящей части факела.

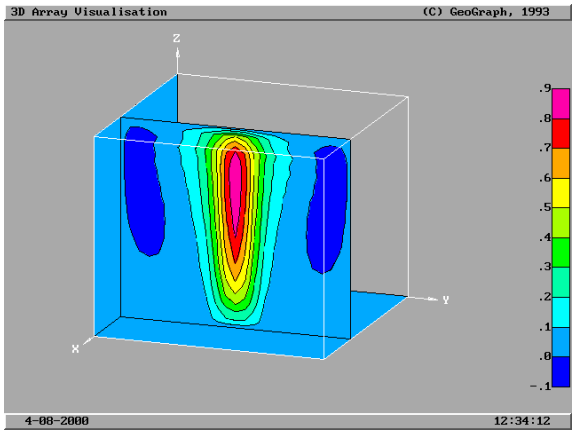


Рис. 1 Поле вертикальной компоненты *W* от источника тепла на нижней границе

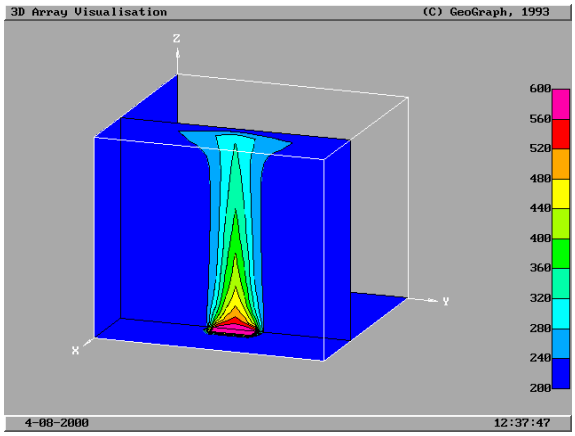


Рис. 2 Поле температуры от источника тепла на нижней границе

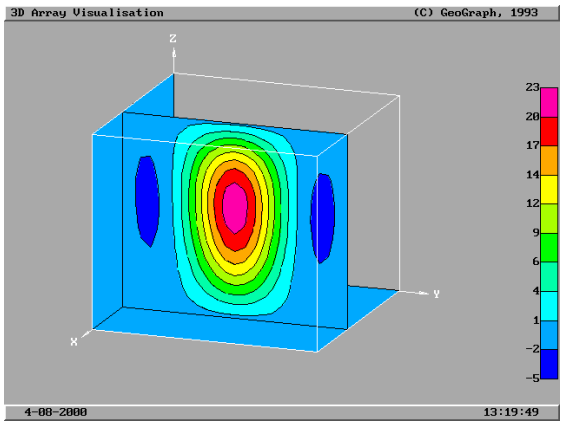


Рис. 3 Поле сопряженного параметра (на однородном поле), *градиент для источника тепла*

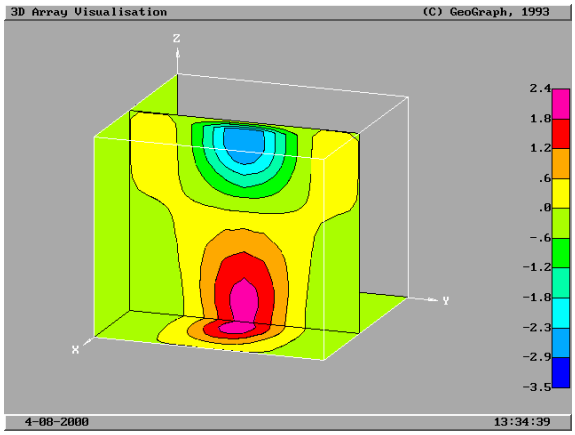


Рис. 4 Поле градиента сопряженного параметра (на однородном поле), *градиент для температуры.*

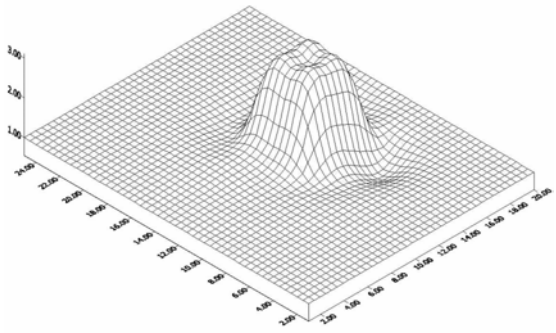


Рис. 5 Температура стенки, полученная расчетом

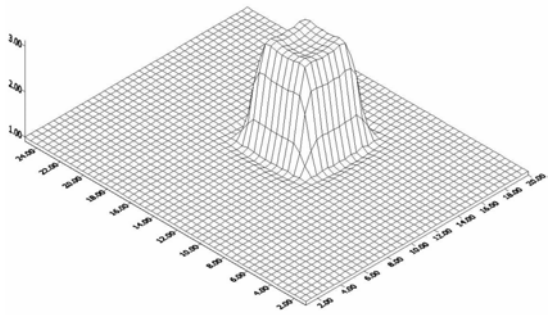


Рис. 6 Искомое распределение температуры стенки

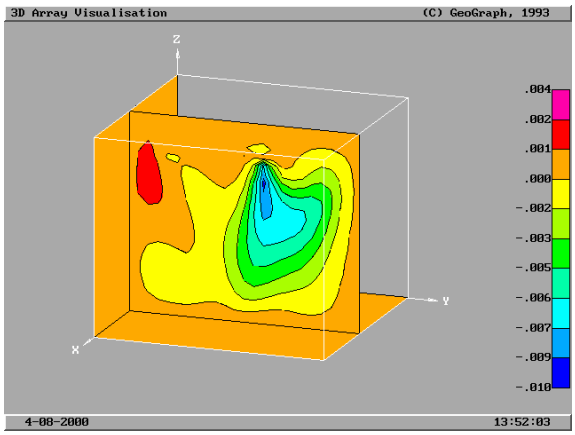


Рис. 7 Поле сопряженного параметра (на неоднородном поле) для двух точек измерения

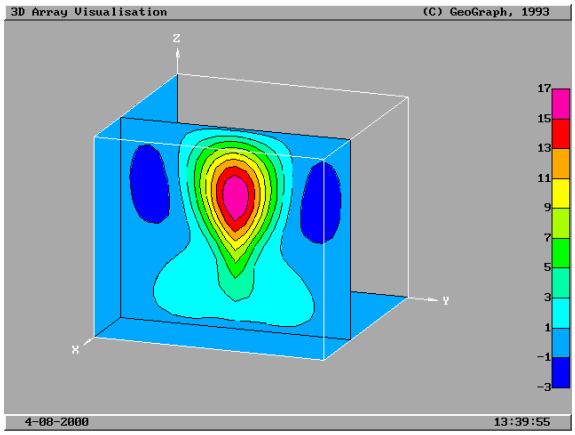


Рис. 8 Поле сопряженного параметра (на неоднородном поле, рис. 1,2), градиент для источника тепла

Обсуждение

Какой физический смысл имеют сопряженные параметры? Ранее сопряженные параметры иногда использовались для расчета вариации некоторых функционалов наблюдения при изменении источников и назывались *функция ценности информации* [2] или *ценность (importance)* [5]. В обратных задачах конвекции они, как правило, используются чисто формально либо для расчета градиента (внутри алгоритма) либо для постановки необходимого условия оптимальности [1,6,7]. Однако, сопряженные параметры отражают эффективность управления в данной точке (количественно) и ценность измерений в конкретной точке (качественно), поэтому их непосредственное использование (вне алгоритмов) представляется в высшей степени желательным.

В данной работе представлена попытка качественного анализа с использованием сопряженных параметров для одной обратной задачи конвекции (трактуемой как задача управления или идентификации).

В данной задаче поле сопряженных параметров указывает на относительную эффективность управления в данной точке (рис. 3,4). Корректность определения сопряженных параметров подтверждается непосредственным решением обратной задачи (рис. 5,6).

Можно также сравнивать две точки измерения по зонам их влияния (рис. 7) и их относительной ценности для измерений.

Влияние начального поля течения также может быть исследовано с помощью сопряженных параметров, на рис. 8 представлено сопряженное поле для неоднородного начального течения (сравнить с рис. 3, где течения нет (однородное начальное поле)).

Заключение

Сопряженные параметры позволяют отслеживать распространение информации в обратных задачах и получать сложные информационные связи, не совпадающие с имеющимися в реальных физических процессах и соответствующие постановкам обратных (некорректно поставленных) задач конвекции.

Визуализация поля сопряженных параметров позволяет найти зоны для наиболее эффективного управления течением и для проведения измерений.

Авторы признательны В.Н. Кочину за предоставление программы визуализации трехмерных течений.

Литература

1. 1. *Pironneau O.* On Optimum Design in Fluid Mechanics// J. Fluid Mech., v. 64, N 1. 1974. pp. 97-110.
2. *Марчук Г.И.,* Сопряженные уравнения и анализ сложных систем, М., Наука, 1992, 336 с.

3. *Алексеев А.К.*, *Бондарев А.Е. Молотилин Ю.А.*, Обратные задачи на основе уравнений Навье-Стокса для задач свободной конвекции, препринт, Инст. Прикл. Мат. РАН, 1994, N 32, С. 1-15.3
4. *Алексеев А.К.,* К управлению свободно-конвективным теплообменом с помощью температуры стенки, Тепломассообмен, ММФ-2000, т. 1, Конвект. тепломассообмен, стр. 59-66, Минск, 2000
5. *Льюинс Дж.,* Ценность. Сопряженная функция, Атомиздат, 1972
6. *Joslin R.D. et al*, Self-contained, automated methodology for optimal flow control*,* AIAA J., v. 35, N 5, pp. 816-824, 1997
7. Huang J. and Modi V., *Optimum Design of Minimum Drag Bodies in Incompressible Laminar Fow Using a Control Theory Approach*, Inverse Problems in Engineering, vol. 1, pp. 1-25, 1994

"Горячие" направления исследований и разработок в области научной визуализации результатов численного моделирования и эксперимента.

Д. В. Могиленских

Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ)

Представленные здесь направления продиктованы реальными прикладными задачами, потребностями и требованиями к современной научной визуализации, которые порождаются в частности во РФЯЦ-ВНИИТФ.

Предлагается обменяться мнениями, комментариями и опытом по следующим направлениям развития и реализации технологий и алгоритмов научной визуализации:

1. Существует потребность реализации инструментов динамической визуализации. Если для 1D численных методик данные инструменты развиваются, в какой то мере давно, то для случаев 2D и 3D моделирования динамическая визуализация не является пока очевидной возможностью.
2. Комплексность и единообразие представления результатов численного моделирования принципиально разными методиками для сравнительного анализа, например, структурированные разностные сетки, конечно-элементные методы, методы частиц (безсеточные данные, SPH-метод), методы характеристик, аналитические решения и т.д. Во всех приведенных разновидностях методов очевидна существенная разница в описании и представлении геометрии и

соответственно физического содержания моделей. Необходимость создания интегрированной среды визуализации, где возможно применить одинаковые инструменты визуализации, например, изолинии, изоповерхности, с другой стороны алгоритмически эти инструменты различны. Примером, подобной системы служит пакет TechPlot.

3. Генерация существенно трехмерной геометрии моделей, дело касается не только описания поверхностей, а больший акцент надо сделать на генерацию 3D сеток.
4. Увеличение быстродействия технических средств приводит пусть к нелинейному росту объемов моделей, но к существенному увеличению размеров сеток. Применение технологий распараллеливания становится обычным подходом при моделировании. По этой причине область научной визуализации должна адекватно вписаться в эти технологии. Можно отметить два момента:
   - Распараллеливание собственно наиболее сложных алгоритмов визуализации;
   - Возможность динамической визуализации 2D и 3D задач, которые считаются в параллельном режиме.
5. Применение COM-технологий для интеграции возможностей научной визуализации как “COM-клиента” и богатейших возможностей графических инженерных пакетов как “COM-серверов” (AutoCAD, Mechanical Desktop и т. д.). Примеров взаимодействия может служить генерация сечений в этих пакетах и дальнейшая их обработка в системе визуализации.
6. Применение OLE, ActiveX-технологий интегрированных специализированных пакетов моделирования непрерывного цикла. Например, задание начальных данных, расчет, визуализация. Есть возможность распараллеливание процесса разработки составных программных компонент.
7. Рассмотрим методики трехмерного моделирования на основе метода Монте-Карло. Геометрия обычно задается аналитическим представлением поверхностей второго порядка, связанных логическими соотношениями. Существуют проблемы при визуализации плоских сечений и трехмерной визуализации результатов моделирования с приемлемой скоростью.
8. Методы частиц, принципиальное их отличие это отсутствие сеток, SPH-метод. Множество проблем возникает при визуализации результатов моделирования и вообще есть проблемы внутри методики, которые тесно связаны с геометрическими алгоритмами, как 2D случае, так и в 3D. Остановимся на некоторых проблемах:
   - Задание начальной геометрии и физических характеристик, особенно векторных;

- Огромное количество частиц;
- Графическое представление частиц в трехмерном случае;
- Применение структуризации данных, например, в виде двоичных или двумерных деревьев, распараллеливание процесса определения видимости;
- Поиск соседей;
- Локализация границ областей;
- Определение векторных величин на границах и т. д.;

9. Существует реальная потребность развития аппаратной реализации новых алгоритмов научной визуализации. Например, создание специализированных аппаратных средств для конкретных приложений молекулярная визуализация, SPH-методы, методы Монте-Карло.
10. До сих пор принципиально не решена проблема переносимости интерфейсов пользователя из одной ОС в другую. Хотя есть некоторые подходы к данной проблеме: Qt, Exceed, TclTk, MainWin).
11. Сближение в данной области математики и программирования усилий программистов, математиков и физиков для развития алгоритмов контроля, адекватности, корректности и повышения информативности графического представления научных результатов.

Выступление Б.Н. Дранченко

ОКБ «Гидропресс», г. Подольск

Я должен заранее предупредить, что я не являюсь специалистом в области вычислительной математики и создания алгоритмов визуализации. Однако я представляю организацию, которая является активным потребителем программных продуктов, вычислительных комплексов и средств визуализации.

Наша организация занимается разработкой, конструированием атомных реакторов. Мы изучаем как вопросы стационарной эксплуатации реакторов, так и различные нештатные ситуации. Эта работа включает в себя и экспериментальное изучение, и моделирование с помощью вычислительных средств. Естественно, здесь никак не обойтись без визуального представления результатов.

Следует сказать, что мы работаем в весьма конкурентной среде. Конкуренция требует особенно глубокой тщательной проработки конструкций на всех уровнях, тщательный анализ и моделирование поведения конструкции в аварийных ситуациях. Это требует проведения исследований на самом современном уровне, который, как правило, необходим заказчику.

Я постараюсь кратко охарактеризовать несколько актуальных проблем, часть которых находится в интенсивном процессе исследования, а к части которых еще только ищутся подходы к решениям. Я думаю, здесь алгоритмы визуализации могут найти большое применение и принести реальную пользу.

Одним из классов таких проблем является моделирование аварийных ситуаций, например, аварийного охлаждения реактора. Моделирование процессов охлаждения в зонах реактора, представляющих особый интерес для конструкторов, визуальное представление возникающих эффектов при охлаждении в этих зонах является насущной задачей.

Кроме аварийных ситуаций алгоритмы визуального представления данных и параметров могут быть очень нужными и в процессе нормальной стационарной эксплуатации. Так, например, оператору на АЭС в процессе контроля режима работы реактора необходимо контролировать чрезвычайно большое количество параметров. Визуальное представление этих параметров могло бы существенно облегчить труд оператора, снизить влияние человеческого фактора в процессе контроля.

Кроме того, следует сказать, что для нашей работы чрезвычайно важно визуально показать заказчику тщательность проработки конструкций реактора, надежности работы во всех режимах. Здесь выработка визуальной концепции представления результатов очень важна.

Хотелось бы добавить, что применение алгоритмов визуализации в нашей области могло бы не только продвинуть вперед и обогатить исследования, но и принести весьма важный социальный эффект, так как проблемы эксплуатации, надежности и безопасности атомной энергетики являются одними из самых важных на сегодняшний день.

Визуализация результатов расчетов в I&CS$_2$ – сетевой информационно-вычислительной системе моделирования термогидродинамических процессов

В. Д. Горячев
Тверской государственный технический университет
Тверь, Россия
valery@tversu.ru http://seliger.tversu.ru

Введение

I&CS$_2$ (Informational and Computational System – Version 2) является второй версией информационно-вычислительной системы, создаваемой в рамках проекта SELIGER: System of Embedded-Linked Information and Graphics for Engineers and Researches [1]. Система разрабатывается научными коллективами кафедры высшей математики ТГТУ (Тверь) и кафедры

гидроаэродинамики СПб.ГТУ (С.-Петербург) как сетевая среда для проведения научных исследований на основе Internet-технологий.
ИВС I&CS_2 функционирует на базе WEB-сервера Apache и гипертекстового препроцессора PHP3. В её основу положены специализированные ресурсы, доступные удаленному пользователю: вычислительные ресурсы (BP) - серверные программы для 2.5D и 3D моделирования методами вычислительной гидродинамики, реляционная база данных PostgreSQL для хранения проектов и результатов текущих и калибровочных (benchmark) расчетов, программы для генерации расчетных сеток и графической обработки результатов моделирования. Графическая обработка результатов математического моделирования двух- и трехмерных стационарных и нестационарных течений является важнейшим этапом проведения исследований в вычислительной гидродинамике. В I&CS_2 для этих целей используются настольная система LEONARDO и программа - аплет LeoNet, позволяющая проводить визуализацию результатов расчетов в Internet в онлайновом режиме.

2. Солверы и БД в I&CS_2

Вычислительное ядро ИВС в настоящий время представлено солвером FRACADM (Flow in Rotating Axisymmetric Cavities And in Ducts - Modified version) с интерфейсной сетевой оболочкой ABCREAD (Analysis of Buoyancy Curvature Rotation Effects in Annuli and Ducts), предназначенном для решения двумерных стационарных и нестационарных задач и автономным программным комплексом SFINKS [2], позволяющим проводить подробные расчеты двух- и трехмерных ламинарных и турбулентных течений с учетом теплообмена в криволинейных системах координат (рис.1).

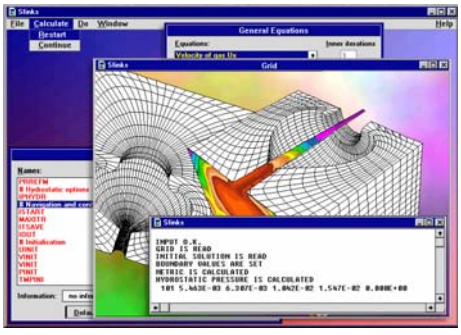


Рис. 1: Интерфейс и формы данных для автономного солвера SFINKS.

Разработанные сетевые версии решателей ориентированы на многопараметрические задачи расчета течений несжимаемой жидкости и конвективного теплообмена в областях со сложными криволинейными границами расчетных областей, в прямоугольных и цилиндрических

полостях, во вращающихся емкостях с осевой симметрией, а также для решения задач о полностью развитом (в продольном направлении) течении во вращающихся прямолинейных и криволинейных каналах с учетом всех возникающих сил и эффектов.

Для управления и контроля вычислительными проектами: регистрации новых задач, установки начальных и граничных условий, задания управляющих параметров, для просмотра результатов вычислений и т.п., разработан менеджер задач, позволяющий подключение новых задач и выделение ресурсов. Клиентская часть менеджера задач выполнена как JAVA аплет (рис.2). Серверная часть менеджера написана на скрипт-языке PHP3 и содержит модули получения списка задач проекта авторизованного пользователя, определения доступных ВР, регистрации новых задач, контроля решения и параметров, запуска задач на решение и удаления ненужных пользователю задач. Все введенные пользователями задачи регистрируются и хранятся в базе данных текущих расчетов.

Кроме вычислительного ресурса сервер содержит также базу данных benchmark-расчетов (рис.3) и библиотеку научных публикаций, выполненных в ИВС. База данных образцовых расчетов содержит наиболее часто встречаемые случаи гидродинамических течений и структурирована по тематике, с учетом влияния различных факторов, определяющих гидродинамику течений в каналах турбин и компрессоров. Её назначение: использование для тестирования и применения для дальнейших прикладных расчетов как некоторого прототипа.

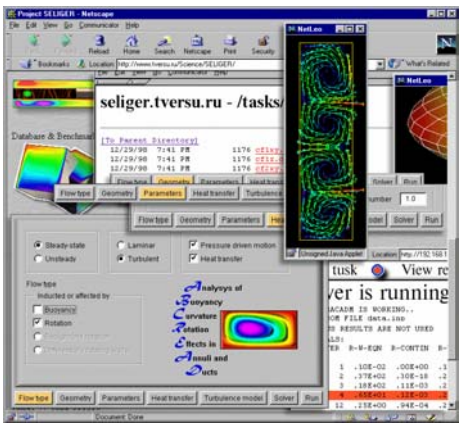


Рис. 2: Вызываемые в Internet клиенты программы ABCREAD и аплеты LeoNet.

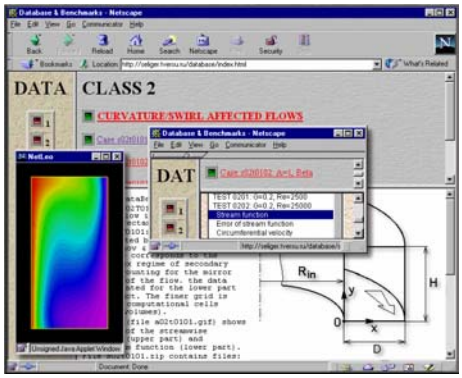


Рис. 3: Окна базы данных калибровочных расчетов.

В настоящее время информационный ресурс - БД калибровочных расчетов содержит файлы результатов расчетов канальных течений, полученных при варьировании различных геометрических и физических параметров. Иерархия записей в БД определяется классом и типом течений. Принята структура, где на самом верхнем уровне данные делятся по шести укрупненным классам проблем гидрогазодинамики и теплообмена.
Для унификации данных разработаны форматы записи постановочно-описательных, числовых и текстовых данных, некоторых интегральных характеристик, представительных распределений (профилей, двух- и трехмерных векторных и скалярных полей). База benchmark-расчетов организована в виде набора плоских файлов с кратким описанием каждого случая расчета, заданием основных параметров течений.

3. ПРЕ- и ПОСТпроцессоры

Для подготовки расчетных двух- и трехмерных сеток в ИВС I&CS_2 используется препроцессор ORIGGIN (Operative and Rational Interactive Grid Generation INstrument).

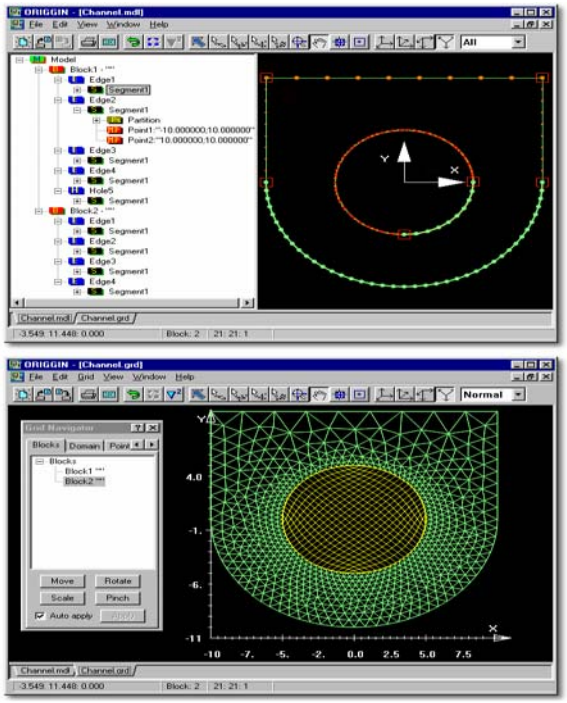


Рис. 4: Этапы создания комбинированной
двухблочной расчетной сетки в программе ORIGGIN.

Эта программа предназначена для построения расчетных двух- и трехмерных комбинированных, блочно-сопряженных, структурированных и неструктурированных сеток, используемых для численного решения задач вычислительной гидродинамики и теплообмена.

Расчетные сетки для областей сложной формы создаются на основе алгебраических методов (трансфинитная интерполяция, метод двух границ с ортогонализацией, триангуляция Делоне, метод движущегося фронта и т.п.) и с использованием дифференциальных уравнений эллиптического типа (генерация сеток с использованием уравнения Пуассона по методу Томпсона - Миддлкоффа).

Препроцессор ORIGGIN в настоящее время является автономной системой подготовки сеток с интерактивным интерфейсом, набором необходимого инструментария для генерации сеток и базой предопределенных моделей проектов. Комбинируя различные методы моделирования и редактирования пользователь может создать расчетную сетку со специальными свойствами, необходимую для проведения расчетов в сложных криволинейных двух- и трехмерных областях, определяемых внутренней или внешней геометрией задачи. Пример создания модели проекта комбинированной двухмерной сетки из двух блоков для решения задачи сопряженного теплообмена в канале показан на рис. 4. Здесь внутренний блок покрыт структурированной сеткой, а внешняя область представлена конечно-элементной сеткой.

ИВС I&CS_2 оснащена двумя типами графических постпроцессоров. Результаты моделирования могут быть визуализированы непосредственно через сеть с использованием программы LeoNet - клиента, вызываемого пользователем ИВС (рис.2). Его функций достаточно, чтобы быстро проводить визуализацию результатов моделирования в заданных сечениях расчетной области задачи, строить карты, поверхности и изоповерхности для представления скалярных переменных, отображать распределение векторных величин и выполнять другие графические операции. LeoNet может быть использован для онлайновой визуализации результатов расчетов как после, так и в процессе работы серверов - солверов и применяться для анализа результатов калибровочных расчетов из БД ИС на сервере данных.

NetLeo разработан на основе объектно-ориентированного подхода и имеет разветвленную иерархию классов. Визуализатор выполнен в виде JAVA аплета, что обеспечивает кросс-платформенное решение обработки и анализа полученных в расчетах результатов. Для быстрой и качественной визуализации, использующей аппаратные возможности ускорения трехмерной графики компьютера, применяется библиотека OpenGL. Для связи программ на JAVA с системными библиотеками написана специальная универсальная графическая библиотека - адаптер для работы с OpenGL из JAVA - UGL. В программе обрабатывается информация на структурированных сетках, в новой версии это будет возможно и для обработки файлов на неструктурированных сетках.

Основным и наиболее оснащенным графическим постпроцессором ИВС является LEONARDO (Linked Equable Objects Natty Accessories for Researcher’s Done Objectify).

В среде системы LEONARDO возможно построение сложных композиционных сцен, отражающих расчеты с качественным рендерингом изображений граничных поверхностей, изоповерхностей, с разнообразными сечениями, отражающими структуру расчетных сеток, в том числе и с любыми плоскостными, изолиниями, картами и построенными на них эпюрами, 2D - графиками, векторными полями и с возможностью расчета треков отмеченных частиц (маркеров) в контрольном объеме для выявления топологии сложных течений. Вид оконного интерфейса последней версии LEONARDO приведен на рис.5.

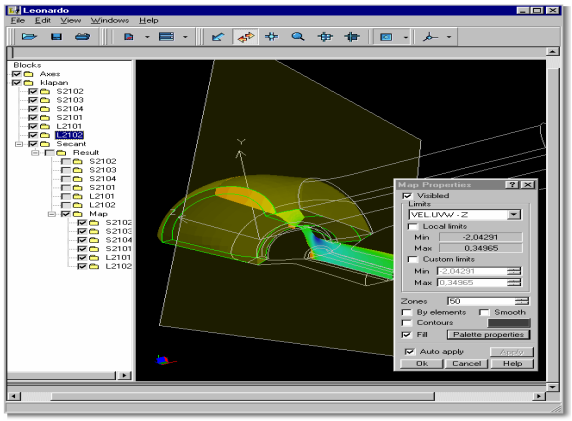


Рис. 5: Визуализация результатов расчетов
многоблочной модели парового клапана в системе LEONARDO.

Возможность проведения визуализации с использованием дерева проекта, в сочетании с достаточным числом графических функций, позволяет пользователю LEONARDO проводить качественный анализ моделируемых сложных отрывных и рециркуляционных течений с выявлением их топологических особенностей.

В новой версии визуализатора возможна обработка результирующих данных по пространственным блокам, полученных от солверов, где проводится численное решение задач с многосвязными областями, в том числе полученное с использованием распараллеливания вычислений. При анализе результатов расчетов пользователь может открывать новые дочерние окна проекта, перетаскивая по необходимости в них выбранные графические объекты визуализации для сопоставления и комбинационного выявления особенностей анализируемых первичных и вторичных (завихренность, дивергенция, градиент, модуль вектора и т.п.) векторных и скалярных полей.

Вывод и архивация подготовленной иллюстративной графики возможны в виде файлов растрового формата TIFF, BMP задаваемого пользователем размера (off-screen rendering) или в виде файлов векторной графики в формате EPS, удобных для дальнейшего использования в качестве научных иллюстраций и для подготовки научных презентаций с анимацией.

4. Примеры визуализации

В качестве примера графической обработки в программе LEONARDO приводится ряд иллюстраций, полученных при анализе расчета ламинарного конвективного течения жидкости во вращающихся подогреваемых вертикальных кольцевых полостях, сопровождаемого зарождением и развитием бароклинных волн при малых значениях числа Прандтля. Интерес к таким течениям давно проявлялся в области геофизической гидродинамики и определялся схожестью явлений в модельном кольце и в атмосферах планет. В последнее время к исследованию течений в кольцевых полостях

проявляется интерес учеными, моделирующими конвекцию расплава кремния в установках выращивания полупроводниковых кристаллов по методу Чохральского. Предполагается, что одним из механизмов развития неустойчивости (которая ухудшает процесс выращивания кристаллов) в подобных течениях является возникновение бароклинных волн. Эти проблемы стимулировали постановку и численное решение задачи [3] (расчеты Н. Г. Иванова).

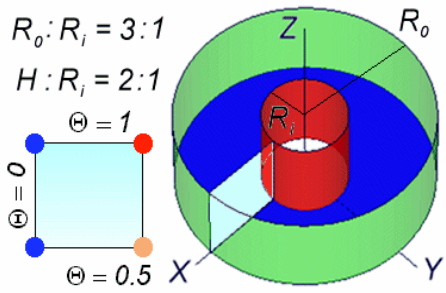


Рис. 6: Схема задания граничных условий в задаче расчета конвективного течения ртути в кольцевой полости.

Геометрия расчетной области представлена на рис. 6. Вращающееся кольцо образовано двумя концентрическими цилиндрами. Отношение радиуса внешнего цилиндра к внутреннему равняется трем, высота кольца в два раза больше радиуса внутреннего цилиндра. Движение жидкости описывается системой трехмерных уравнений Навье-Стокса, записанных в приближении Буссинеска, в сочетании с уравнением энергии.

Для заданной геометрии конвекция определяется тремя параметрами: числом Рэлея $Ra=3{,}38 \times 10^4$, числом Россби $Ro=6{,}67$ и числом Прандтля $Pr=0{,}015$. На стенках кольцевой области задается условие прилипания для скорости и осесимметричное распределение нормированной температуры $\Theta = (T - T_i)/(T_{max} - T_i)$. На стенке внутреннего цилиндра $\Theta = 0$, на нижней поверхности температура изменяется линейно по радиусу от $\Theta = 0$ до $\Theta = 0{,}5$, на внешнем цилиндре изменяется линейно по высоте от $\Theta = 0{,}5$ до $\Theta = 1$, верхняя поверхность считается адиабатической.

В расчетах использовались две сетки со сгущенными к стенкам кольца узлами: исходная, размерностью 60×20×20 ячеек, и измельченная, размерностью 120×40×40 ячеек.

В используемом программном коде SINF/SFINKS для получения нестационарного решения реализована неявная схема первого порядка по физическому времени. Продвижение по фиктивному времени осуществлялось по методу искусственной сжимаемости. Использовалась неявная схема первого порядка, основанная на линеаризации определенного исходными уравнениями дифференциального оператора и на методе приближенной факторизации [4]. Для расчета конвективных членов в

уравнениях переноса импульса применялась противопоточная схема высокого порядка QUICK [5], для дискретизации членов, отражающих влияние вязкости, применялась центральная разностная схема второго порядка.

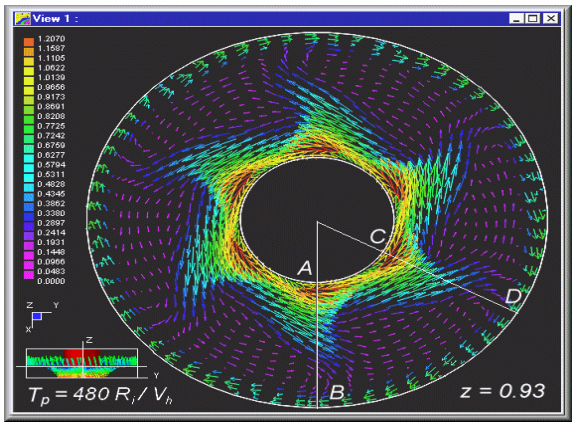


Рис. 7: Поле скоростей в одном из поперечных сечений кольцевой полости.

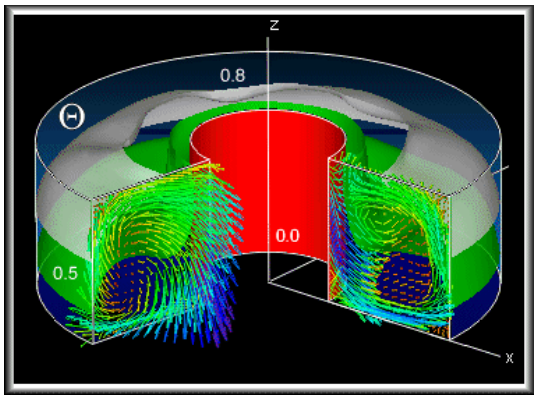


Рис. 8: Изотермические поверхности Θ = 0.0, 0.5, 0.8 и поля скорости в меридиональных сечениях кольцевой полости.

Решение, полученное на исходной сетке, представляет собой систему бароклинных волн с волновым числом m=6. На основную волновую структуру, которая прецессирует в
направлении основного вращения с угловой скоростью на порядок меньшей средней, наложена слабая низкочастотная модуляция.
В решении, полученном на измельченной сетке, на эту основную структуру накладываются дополнительные гармоники. Применение процедуры фильтрации позволяет выявить структуру основного течения в форме шести ячеек, представление о форме которых дается распределением векторного поля в одном из сечений расчетной области на рис. 7.

Примеры визуализации течения с построением изоповерхностей даны на рис. 9 и 10. Для графических построений использовались графические функции, сочетающие методы рендеринга полупрозрачных изоповерхностей выбранных скалярных полей, построение векторных полей скорости, расчет и изображение полей завихренности, динамический расчет траекторий отмеченных жидких частиц и линий тока, анализ срезов течения в различных плоскостях с дальнейшим переносом временных фреймов в анимационные клипы.

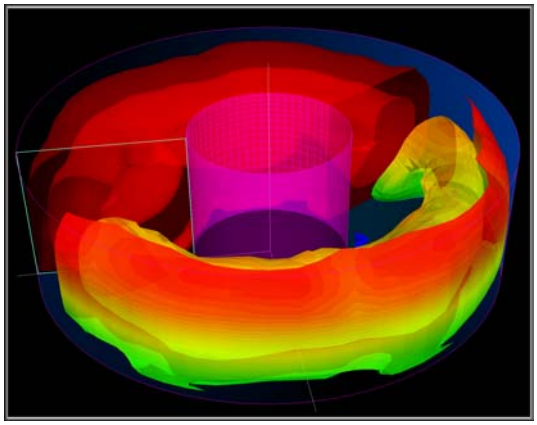


Рис. 9: Изотахи. На изоповерхностях осевой компоненты скорости нанесены карты распределения температуры с цветовой индикацией её значений.

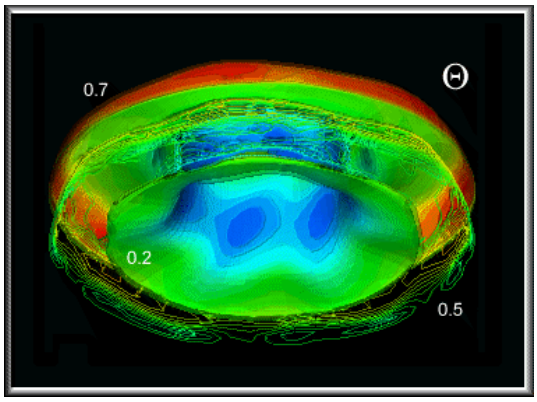


Рис. 10: Изотермы. На изоповерхностях постоянной температуры нанесены карты и изолинии распределения модуля скорости с цветовой индикацией её значений.

Примененный на рис. 7. традиционный “вид сверху” оказался наиболее эффективным для выявления структуры возникающих бароклинных волн при течении жидкости в кольцевой полости.

При визуализации скалярных полей на рис. 8, 9, 10 использовалась техника выделения цветом отдельных значений анализируемых скалярных полей и наложения на полупрозрачные изоповерхности одних скалярных величин карт с цветовой индикацией локального распределения на этих поверхностях других скалярных величин, что помогает при анализе их взаимного влияния друг на друга.

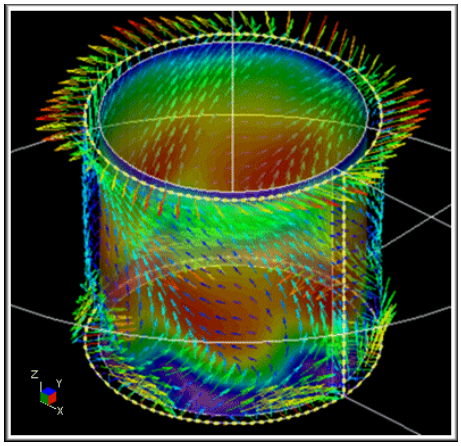


Рис. 11: Сочетание изображений векторного поля скорости и карты распределения температуры в зоне высоких градиентов последней у внутреннего цилиндра кольцевой полости.

На рис. 11 показана комбинация двух видов полей: векторного и скалярного, отнесенных к одной координатной поверхности - цилиндру около внутренней стенки кольцевой полости, где градиенты температуры наиболее велики, что ведет здесь к активному перемещению потока жидкости и формирует его структуру. Такое сочетание при визуализации позволяет выявить прямое и корреляционное взаимодействие различных расчетных величин достаточно эффективно.

Картина векторного поля скоростей хороша для показа плоских течений, однако при анализе пространственного завихренного течения она становится очень сложной и при наличии высокого разрешения криволинейных расчетных сеток в трехмерных случаях дает очень запутанное, а иногда и неверное представления о структуре течения из-за эффектов окклюзии. В программе есть инструментарий для управления разряжением поля и управления длиной, формой и цветом векторов, однако это часто мало помогает пониманию тонкой структуры течения. Использование маркеров жидких частиц дает возможность проследить движение потока более подробно.

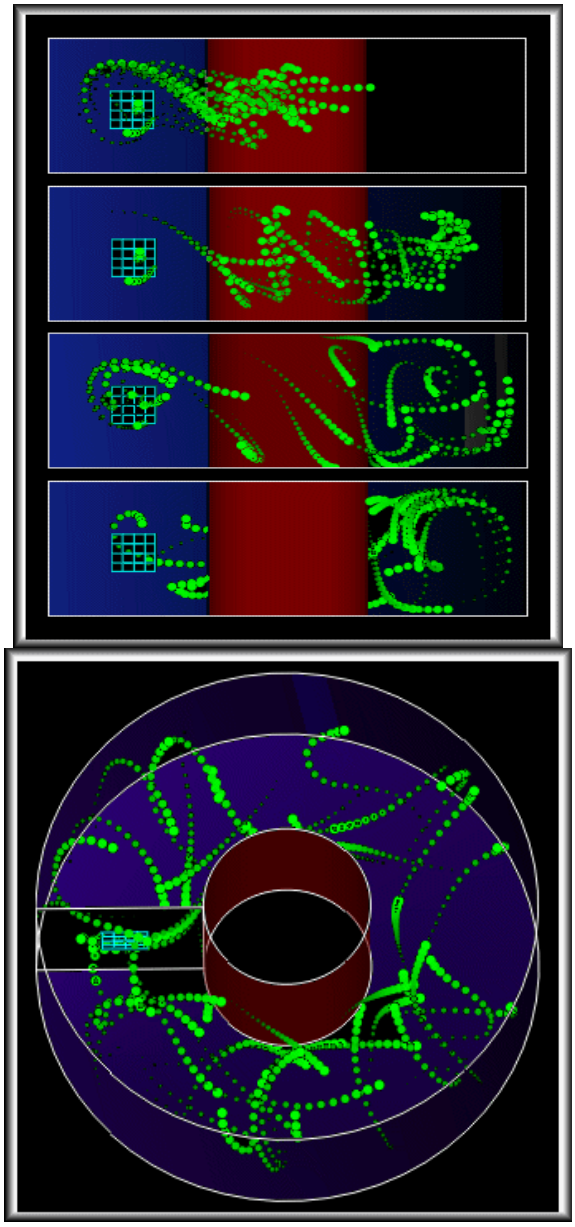


Рис. 12: Треки отмеченных жидких частиц**.**

Запуск маркеров или целого их семейства из заданной точки или области при наличии достаточно производительного компьютера позволяет получить анимацию движения потока жидкости с выделением локальных особенностей - критических точек, мест отрыва и присоединения потока к стенкам.

При реализации этого естественного (после эксперимента) метода визуализации течений особое место можно уделить выбору условных изображений отмеченных частиц. Стандартное представление траекторий частиц в виде шариков, плоских и цилиндрических лент с управление их цветом в зависимости от других расчетных величин и вторичных полей, может быть дополнено стилизацией траекторий эффектами с моделированием диффузии капель, имитацией турбулентного

перемешивания и

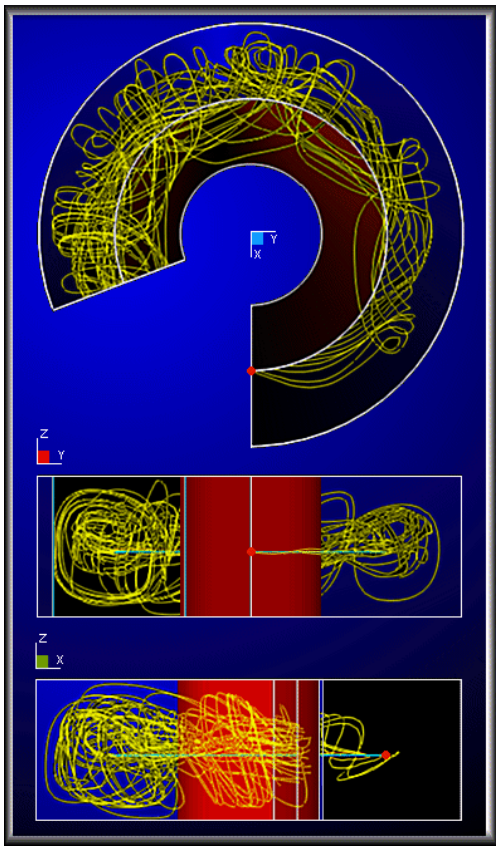


Рис. 13: Визуализация вихревого течения с имитацией ввода дополнительной красящей жидкости.

распространения дыма (если это допускается контекстом решенной задачи). Виды расчетных траекторий отмеченных частиц показаны на рис. 12 и 13. В последнем случае для стилизации треков использовались фрактальные фильтры из программы Fractal Design Painter 5.0.1.

Для понимания тонких деталей стационарных, а тем более нестационарных течений, полученная видеоинформация может быть использована для дальнейшего объединения в презентационные видеоклипы.

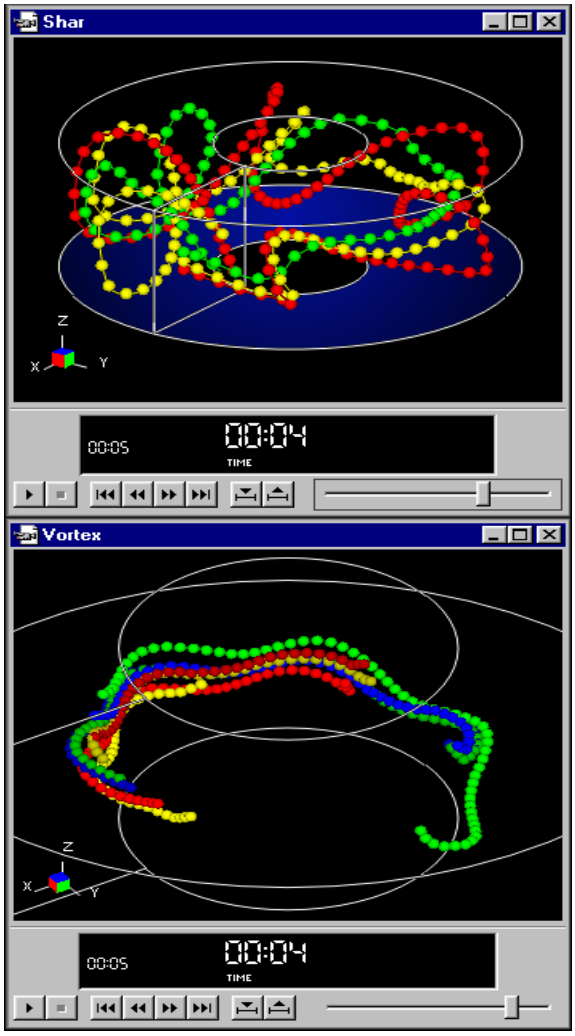


Рис. 14: Кадры анимаций для анализа влияния сравнительных эффектов первичного поля скорости и вторичного поля завихренности на формирование бароклинных волн в кольцевой полости.

Кадры из подобных анимаций для анализируемой задачи приведены на рис. 14.

5. Заключение

Рассмотрены структура и программное наполнение информационно-вычислительной системе I&CS$_2$.

Дано описание графических пре- и постпроцессоров системы с примерами обработки данных, полученных при анализе численного моделирования ламинарного конвективного течения жидкости во вращающихся подогреваемых вертикальных кольцевых полостях, сопровождаемого зарождением и развитием бароклинных волн.

Новая версия ИВС является перспективной для расширения и объединения с независимыми вычислительными ресурсами в сети Internet. Размещенные в

WWW вычислительные ресурсы могут быть использованы для индивидуальной и коллективной работы специалистами разных научных направлений, применены для обучения.

Разработка ИВС и прикладных программ на разных этапах работы поддерживалась грантами РФФИ (99-07-90103) и Минобразования (15-Гр-98, 98-17-33).

6. Литература

[1] *Goryachev V.D., Smirnov E.M.* "A Computer and Information System for Computer Fluid Dynamics: SELIGER". In: Proc. of the 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Math. 09. 24-29. 1997. Berlin, Vol. 3, 1997, pp. 47-53

[2] *Smirnov E.M.* Numerical Simulation of Turbulent Flow and Energy Loss in Passages with Strong Curvature and Rotation Using a Three-Dimensional Navier-Stokes Solver, Rept., "Research in Brussels"Actions, Dept. Fluid Mech., Vrije Universiteit Brussel, 1993, 103 p.

[3] *Goryachev V., Ivanov N., Smirnov E.* "Poscomputational Visualization of Baroclinic Wave Drift". In: Proc. of the Second Int. Conf. "Science & Art 2000", 28.02-04.03. 2000, Zurich, Switzerland, 6 p.

[4] *Beam R.M., Warming R.F.* An implicit factorized scheme for the compressible Navier-Stokes equations // AIAA Journal, Vol. 16, 1978, pp. 393-402.

[5] *Leonard B.P.* A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation // Computational Methods Applied Mechanics Engineering, Vol.19, 1979, pp. 59-98.

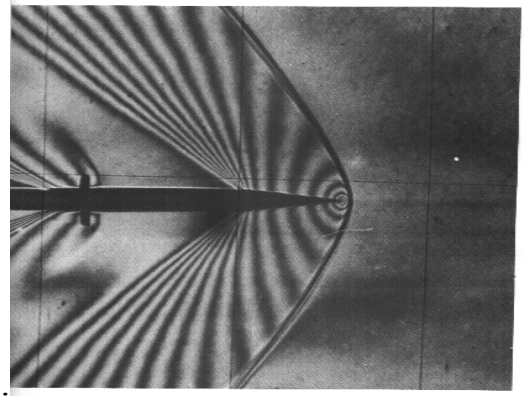
Научная визуализация результатов физического и численного экспериментов

Е.Н.Бондарев

Московский государственный авиационный институт (технический университет)

Существует аналогия между численным и физическим экспериментом. В физическом эксперименте во многих случаях именно оптическая картинка является основным первичным результатом исследований. В ядерной физике можно привести пример камеры Вильсона, в которой исследуются траектории ядерных частиц с использованием фотографий этого явления. В области аэродинамики фотография картины обтекания является основным или доже единственным первичным результатом исследований на некоторых экспериментальных установках. В качестве примера можно привести аэробаллистические установки. Аэробаллистическая установка представляет собой ствольное орудие или ружье, из которого выстреливается модель в

испытательную камеру или во встречный поток. Испытательная камера может быть заполнена воздухом или другими газами. В испытательной камере производится искровая фотография модели с применением теневого прибора, прибора Теплера или с применением интерферометра. Эта фотография очень часто является единственным первичным результатом эксперимента. Нужный научный результат получают путем качественной и количественной обработки фотографии. В теневом приборе интенсивность почернения на фотографии пропорциональна второй производной плотности. Это позволяет выделить скачки уплотнения, волны разрежения, границы областей отрывного течения. Прибор Теплера реагирует на первую производную плотности, а интерферометр реагирует на саму величину плотности и позволяет выделить линии равной плотности. Здесь приводится пример применения теневого прибора для фотографии сверхзвукового обтекания модели. На фотографии хорошо различаются скачки уплотнения.



Опыт визуализации в физическом эксперименте может быть использован и в численном эксперименте. При проведении расчетов обтекания модели методами сквозного счета иногда необходимо выделить скачки уплотнения, точки отрыва и другие особенности течения.

Одним из способов выделения этих особенностей может быть расчет первых или вторых производных плотности и выделение областей максимумов этих величин. В отличие от физических методов исследования численный эксперимент позволяет проделать такую процедуру не только с плотностью, но и с другими параметрами течения. Опыт визуализации результатов исследований в физических экспериментах может оказать помощь при визуализации численных исследований.

Выступление С.П. Ботуса

Федеральный институт промышленной собственности

Я представляю Федеральный институт промышленной собственности и занимаюсь анализом технических решений, которые патентоспособны с точки зрения обработки и представления многомерных данных. В основном патентуются иностранные фирмы, наши фирмы на патентном рынке почти не выступают.

Необходимо сказать, что проблемы патентования российских технических решений являются крайне недооцененными в настоящее время. В то же время патентная незащищенность российский технических решений может негативно сказаться в будущем при дальнейшем развитии и совершенствовании разработок.

Существует разработанная нами методика, которая позволяет российским специалистам с ограниченными ресурсами воспользоваться этой методикой и свои идеи вывести на уровень патентоспособных решений и выйти на патентный рынок.

Применение цифровой обработки изображений для визуализации результатов газодинамических расчетов

С.Б.Базаров

МГУ им.М.В.Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики

Использование результатов математического моделирования, получаемых методами сквозного счета, требует формализованного выявления координат разрывов. Эта процедура сопряжена с серьезными трудностями при изучении нестационарных течений и анализе движения разрывов. В таких расчетах в зависимости от используемого метода профиль разностной ударной волны занимает три-пять, а контактного разрыва – пять-семь элементов сетки. По мере перемещения в пространстве также происходит деформация градиентных областей. Поэтому необходима регламентация приемов, используемых для определения координат разрывов. Следует отметить, что аналогичные вопросы стандартизации процедуры сравнения возникают и при сопоставлении результатов математического моделирования одной и той же задачи, полученных различными численными методами.

Результат численного расчета течения невязкого сжимаемого идеального нетеплопроводного газа – это набор массивов параметров на сетке, требующих дополнительного анализа. Цель описываемого подхода состоит в автоматизации обработки результатов проведенного численного моделирования газодинамического течения для получения структуры его

сильных разрывов. Будем использовать следующую интерпретацию основных понятий вычислительной газодинамики в терминах цифровой обработки изображений:

Численное решение	Цифровое изображение
Шаблон разностной схемы	Окно изображения
Ячейка пространственной сетки	Пиксел (воксел)
Сильный разрыв	Перепад яркости
Размазывание разрыва	Расфокусировка изображения
Паразитные осцилляции решения	“Шумы” изображения
Локализация разрыва	Детектирование перепадов
Сглаживание решения	Сглаживание функции интенсивности

Рассмотрим функцию, соответствующую какому-либо параметру течения, например, плотность. Трактуя саму эту функцию как интенсивность изображения, а значения этой функции в каждой точке как элементы изображения (пиксели), в каждой точке воспользуемся детектором перепадов и вычислим выражения – дискретные свертки данного окна изображения. Вычислим среднее значение градиента по всему расчетному полю и выберем те точки, в которых градиент превышает среднее значение.

Поскольку при решении по схеме сквозного счета разрывы “размазаны”, то в такое множество попадают не только пиксели истинных перепадов, но и близлежащие. Для их исключения применяется метод подавления немаксимумов, при котором исключается конкуренция между собой соседних точек, расположенных вдоль перепада, а также для сохранения свойства линейной протяженности перепада исключаются изолированные выбросы интенсивности изображения.

Далее рассматриваются дискретные аналоги соотношений газодинамических параметров, выполняемых на разрыве течения, и разрыв относится к конкретному типу: нормальные ударные волны, косые ударные волны, тангенциальные разрывы, чисто контактные разрывы, волны сжатия.

Приведем примеры применения данной методики к результатам конкретных расчетов. Рассмотрим задачу о дифракции ударной волны на плоском прямом угле. Картина такого течения очень сложна, так как имеется большое число разрывов различного типа.

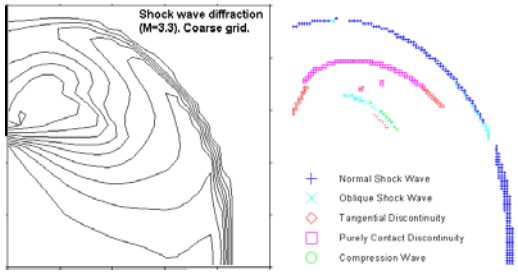


Рис.1

На рис.1 приведены линии равной плотности и точки разрывов, полученные в процессе распознавания. Таким образом показано, что даже весьма грубая сетка не является препятствием для определения структуры течения. Важным в численном моделировании является не только получение наборов чисел – результатов расчетов, но и их интерпретация.

Рассмотрим задачу о встречном взаимодействии двух прямых ударных с плоскими фронтами.

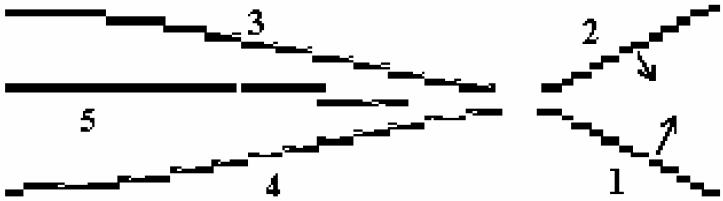


Рис.2

На рис.2 показано положение разрывов для случая взаимодействия под острым углом волн с числами Маха 4.7 (1) и 4.2 (2). Полученное решение: две преломленные косые ударные волны (3 и 4) и тангенциальный разрыв (5) между ними совпадает с аналитическим решением данной задачи.

Изложенный подход не зависит от конкретного вида решаемой задачи и не требует никакой априорной информации о течении. Он применим к результатам расчетов, полученных любым методом сквозного счета, облегчает и ускоряет обработку результатов численного моделирования, а также повышает объективность интерпретации получаемых результатов.

Визуализация как способ исследования особенностей динамики сложных систем.

В.Г. Яхно
Институт Прикладной Физики РАН,
yakhno@appl.sci-nnov.ru

Кроме разнообразных технических применений, методы визуализации имеют разнообразные применения в исследованиях динамики функционирования биологических объектов. Об этом, конечно же, известно многим. Тем не менее, хотелось бы обратить внимание участников дискуссии именно на биологические приложения научной визуализации. Они представляют сейчас одно из интереснейших направлений развития физики сложных систем.

Все биологические системы по своей архитектуре и функциональной организации состоят из множества взаимосвязанных активных элементов. Поэтому желание понять механизмы их функционирования обязательно приводит к изучению динамических структур, отражающих вариации картин активных состояний этих элементов. Описание пространственной организации рисунка активности и временных изменений таких картин обычно связано с очень большим объемом данных. Поэтому начальный этап исследований возможен лишь с привлечением методов визуализации и методов сравнения изображений.

Приведу здесь только два вида примеров.

Первый набор связан с наглядным визуальным представлением как экспериментальных данных об активности в ансамблях взаимосвязанных нейроноподобных элементов, так и результатов математического моделирования протекающих в них процессов.

Например, данные серии экспериментов по регистрации изменений формы рецептивных полей «простого» нейрона в зрительной коре от правого и левого глаза животного [1-2] были представлены в следующем наглядном для восприятия виде (см. Рис.1).

Аналогичные данные из работ [3-4] были использованы для построения математических моделей нейроноподобных систем ориентированных на выделение характерных признаков входных изображений. Правильность модельных расчетов и эффективность работы алгоритмов, реализованных в такой системе интегро-дифференциальных уравнений [4-10], также может быть воспринята и оценена в первую очередь лишь с помощью изображений (Рис. 2-3).

Второй набор примеров связан с разработкой самонастраивающихся распознающих систем, позволяющих учитывать особенности входного

изображения или ситуаций, в которых работает такая автоматическая система. При конструировании адаптивных систем анализа сложных изображений алгоритмы визуализации крайне необходимы для оценки эффективности работы алгоритмов кодирования [9]. В этом случае сопоставление производят по тестовым изображениям (например, как на Рис. 2-3). Известно также, что обратные связи в самонастраиваюшихся системах способствуют возникновению разнообразных режимов самовозбуждения (см. Рис. 4), которые чаще всего приводят к сбоям в нормальной работе системы [11]. Диагностика условий, при которых возможны функциональные срывы в распознающих системах, относится к очень важному элементу процесса конструирования. В настоящее время такую визуальную диагностику обычно выполняют сами разработчики. В дальнейшем подобные операции сравнения естественно автоматизировать. Поэтому при разработке иерархических технических систем обработки больших потоков информации очень важную роль будут играть алгоритмы визуализации.

Имеются, конечно, серьезные трудности при организации работ, связанных с развитием методов визуализации и реализацией конкретных приложений. Но они, как было здесь объявлено, находятся за рамками сегодняшней дискуссии.

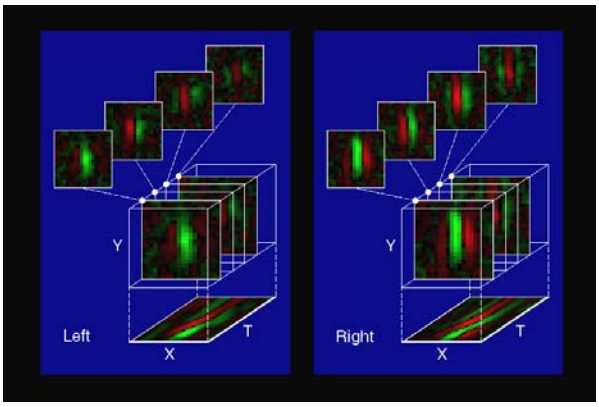


Рис. 1. Большая часть нейронов в зрительной коре может быть активирована как от правого, так и от левого глаза. Такие бинокулярные нейроны предназначены для первичной обработки и определения глубины расположения наблюдаемого объекта. Рецептивные поля от правого и левого глаза получены при регистрации активности простой клетки в зрительной коре кошки. Пространственные особенности рецептивных полей (X, Y) в различные моменты времени (T) визуализированы в виде трехмерных изображений. В верхней, левой части каждого параллелепипеда приведены четыре примера пространственных профилей рецептивных полей (в моменты времени T=50, 100, 150, и 200 мсек). Каждый из этих профилей рецептивных полей показан в виде карты интенсивностей реагирования клетки. Интенсивности зеленых и красных областей - соответствуют средним величинам реакции клетки на светлую или темную полоску-стимул в данном

месте рецептивного поля соответственно. Интегрирование трехмерных данных вдоль оси Y позволяет получить упрощенный, пространственно-временной профиль рецептивных полей, или X-T карты. Пространственные изменения структуры рецептивных полей во времени означают, что данный нейрон настроен на селекцию движения. Рисунок и описание к нему взяты из работы [1]: Ohzawa et al., NeuroReport 8 (3): R3-R12, 1997.

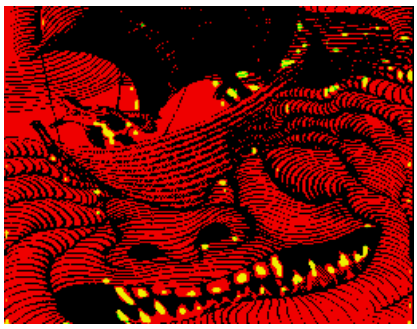
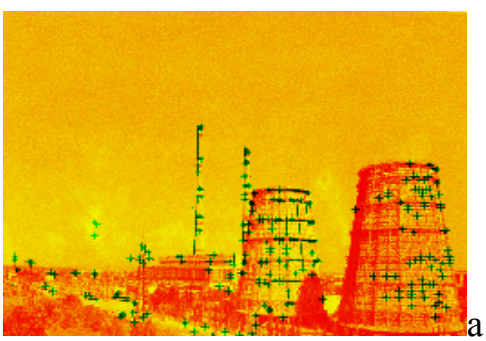


Рис. 2. Выделение крестообразных фрагментов на исходном изображении. На этом рисунке совмещены изображения исходное и получившееся в результате выделения крестов [10].


а

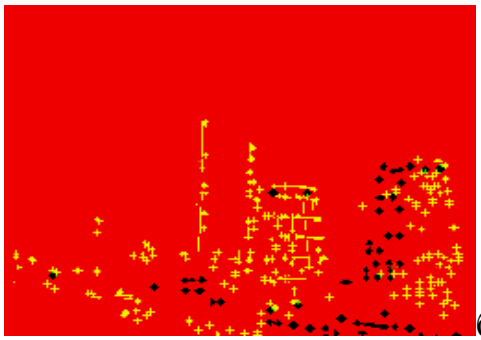

б

Рис. 3. Выделение фрагментов в виде крестов (а) и ромбов (б) на изображении промышленных объектов с помощью математической модели нейроноподобной системы. На рис.1а совмещены изображения исходное и получившееся в результате выделения крестов, на изображении 1б совмещены выделенные фрагменты в виде крестов и ромбов [10].

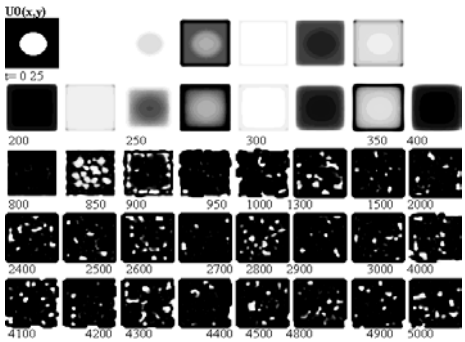


Рис. 4. Вариант режима самовозбуждения пространственных структур в блоке распознающей системы, первоначально настроенном на выделение контуров изучаемых объектов на входном изображении [11].

Список литературы:

1. Ohzawa et al., NeuroReport 8 (3): R3-R12, 1997.

2. Anzai A., Ohzawa I., Freeman R.D. Neural Mechanisms for Encoding Binocular Disparity, Journal of Neurophysiology, V. 82, No 2, 1999, pp.874-924

3. *Hubel D. and Wiesel T.* Receptive fealds, binocular integration and functional architecture in cat's visual cortex // J.Physiol.1962.V.160.P.106-154.

4. *Wilson H.R., Cowan J.D.* A Mathematical Theory of the Functional Dynamics of cortical and Thalamic Neuron Tissue // «Kibernetic». 1973. V.13. P.55-80.

5.*Сбитнев В.И.* Перенос спайков в статистических нейронных ансамблях. II. Нейрон-нелинейный источник спайков // Биофизика. 1976. Т. 21. С.1072-1076.

6. *Кудряшов А.В., Яхно В.Г.* Распространение областей повышенной импульсной активности в нейронной сети //В сб. Динамика биологических систем.1978. Вып.2.С.45-59. 7. *Мастеров А.В., Рабинович М.И., Толков В.Н., Яхно В.Г.* Исследование режимов взаимодействия автоволн и автоструктур в нейроподобных средах // В сб. Коллективная динамика возбуждений и структурообразование в биологических тканях.1988. ИПФ АН СССР.С.89-104.

8. *Belliustin N.S., Kuznetsov S.O., Nuidel I.V., Yakhno V.G.* Neural Networks with Close Nonlocal Coupling for Analyzing Composite Images // Neurocomputing. V.3.1991.P.231-246.

9. *Яхно В.Г., Беллюстин Н.С., Красильникова И.Г., Кузнецов С.О., Нуйдель И.В., Панфилов А.И., Перминов А.О., Шадрин А.В., Шевырев А.А.* Исследовательская система принятия решений по фрагментам сложного изображения, использующая нейроноподобные алгоритмы // Изв.вузов, Радиофизика. 1994. Т. 37, N8. С.961-986.

10. *Nuidel I.V., Yakhno V.G.* Modeling of Extraction of Image Fragments in the Forms of Crosses and Rhombuses in the Simulated Receptive Fields // The Proc. Of the 2000 6-th IEEE International workshop on «Cellular Neural Networks and their Applications» (CNNA2000).P45-49 (2000).

11. *Kuznetsova G.D., Nuidel I.V., Khurlapov P.G., Yakhno V.G.* Modeling of normal and pathological sensor activity image transformation versions in an animal's cortex // The Proc. SPIE «Optical Information Science and Technology» – in Optical Memory and Neural Networks, Andrei L.Micaelian, Editor, Proceedings of SPIE V.3402. P. 486–499 (1998).

Математическое моделирование процессов формирования и эволюции токовых слоев в трехмерных магнитных конфигурациях.

Ечкина Е. Ю., Леоненко А. В.
Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова ВМиК
ejane@cs.msu.su, lalex@cs.msu.su

Введение.

Большая часть вещества во вселенной находится в состоянии плазмы, которая пронизана магнитным полем.

Магнитные поля играют определяющую роль в формировании структуры космической плазмы, приводя к образованию магнитосфер звезд и планет, пятен, других активных областей на Солнце.

Для описания подобных процессов весьма эффективным является МГД приближение.

В рамках МГД-приближения описываются многие процессы, протекающие при солнечных вспышках.

Во всех этих явлениях либо непосредственно наблюдается, либо предполагается быстрая диссипация магнитной энергии в высокопроводящей плазме, которую обычно связывают с изменением структуры магнитного поля - магнитным пересоединением.

При пересоединении нарушается одно из основных фундаментальных свойств высокопроводящей – плазмы вмороженность магнитного поля в проводящую жидкость, так что происходит диффузия магнитных силовых линий относительно вещества.

Магнитное пересоединение возникает в областях, которые характеризуются значительными плотностями электрического тока. Наряду с фронтами ударных волн такими областями являются токовые слои, которые разделяют магнитные поля противоположных направлений и которые естественным образом могут возникать при неоднородных течениях высокопроводящей замагниченной плазмы. По своей природе они являются довольно неустойчивыми и спорадическими образованиями. Токовые слои могут играть важную роль в явлении солнечной вспышки.

В силу существенной нелинейности процесса формирования токовых слоев, картина течения и распределения электрического тока в плазме не очевидна и не может быть описана в виде суперпозиции или незначительной модификации известных ранее автомодельных решений, поэтому предлагается использование математического моделирования исследуемого процесса.

Постановка задачи и результаты МГД - моделирования.

В трехмерном случае численно решается полная система МГД-уравнений. Предполагается, что коэффициенты переноса, характеризующие плазму: магнитная вязкость ν_m, электропроводность σ, коэффициент теплопроводности κ - постоянны, и $\nu_m = c^2/4\pi\sigma$ Магнитное поле описывается с помощью вектор-потенциала **B**=rot **A**.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0,$$

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v}\right) = -\frac{\beta}{2}\nabla p + [\operatorname{rotrot} \mathbf{A} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}],$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = [\mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}] + \nu_m \Delta \mathbf{A},$$

$$\frac{\rho}{\gamma - 1}\left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)T\right) + p \operatorname{div} \mathbf{v} = \operatorname{div}(\kappa \nabla T) + 2\nu_m \frac{(\Delta \mathbf{A})^2}{\beta},$$

$$p = \rho T.$$

Моделирование проводилась в кубическом расчетной области. В начальный момент времени плазма с постоянной плотностью и давлением равной 1 покоится в потенциальном магнитном поле, заданном следующим образом.

$$\mathbf{B} = ax\mathbf{e}_x + by\mathbf{e}_y - (a+b)z\mathbf{e}_z.$$

Система выводится из равновесия в результате возбуждения электрического тока на границе расчетной области. Электрический ток здесь направлен вдоль оси z.

Мы рассматривали три случая, соответствующих различным исходным конфигурациям магнитного поля. В первом и втором случаях возбуждаемый электрический ток параллелен сепаратрисной плоскости, а в третьем случае ортогонален.

В первом случае компоненты выбираются так, что a=1.65, b=-1.35 сепаратрисная поверхность магнитного поля параллельна оси z и лежит в плоскости x=0, во втором случае a=0.25, b=-0.75 сепаратрисная поверхность магнитного поля параллельна оси z и лежит в плоскости y=0, в третьем a=1.3 и b =0.7. сепаратрисная поверхность перпендикулярна оси z и лежит в плоскости z=0.

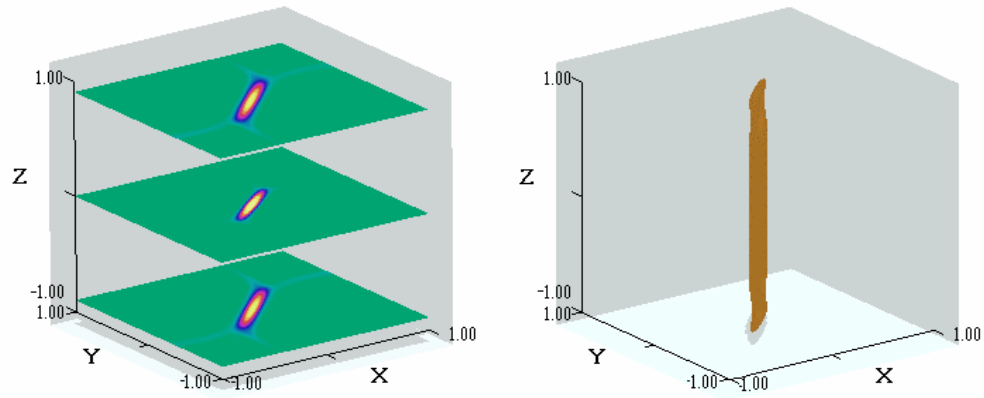
Граничные условия соответствуют возбуждению электрического тока. Для моделирования сходящейся к нулевой точке вдоль Z-координаты МГД-волны зададим граничные условия на z-компоненты вектор-потенциала магнитного поля.

Граничные условия для остальных величин ставятся в соответствии с МГД-уравнениями. В представленных результатах расчетов были взяты следующие значения пареметров.

Первая серия расчетов проводилась для магнитного поля, с параметрами a=1.65, b=-1.35. Сепаратрисная поверхность магнитного поля

лежит в плоскости x=0. Слабовозмущенная нулевая линия магнитного поля, параллельная оси z.

Видно формирование токового слоя в окрестности нулевой точки. В центральной части слоя токовый слой в основном направлен вдоль оси *z*. Геометрические характеристики - ширина и толщина токового слоя - подобны характеристикам токового слоя в двумерной магнитной конфигурации. На рисунках представлена изоповерхность плотности электрического тока и слайды распределения плотности электрического ток для различных значений z-координаты

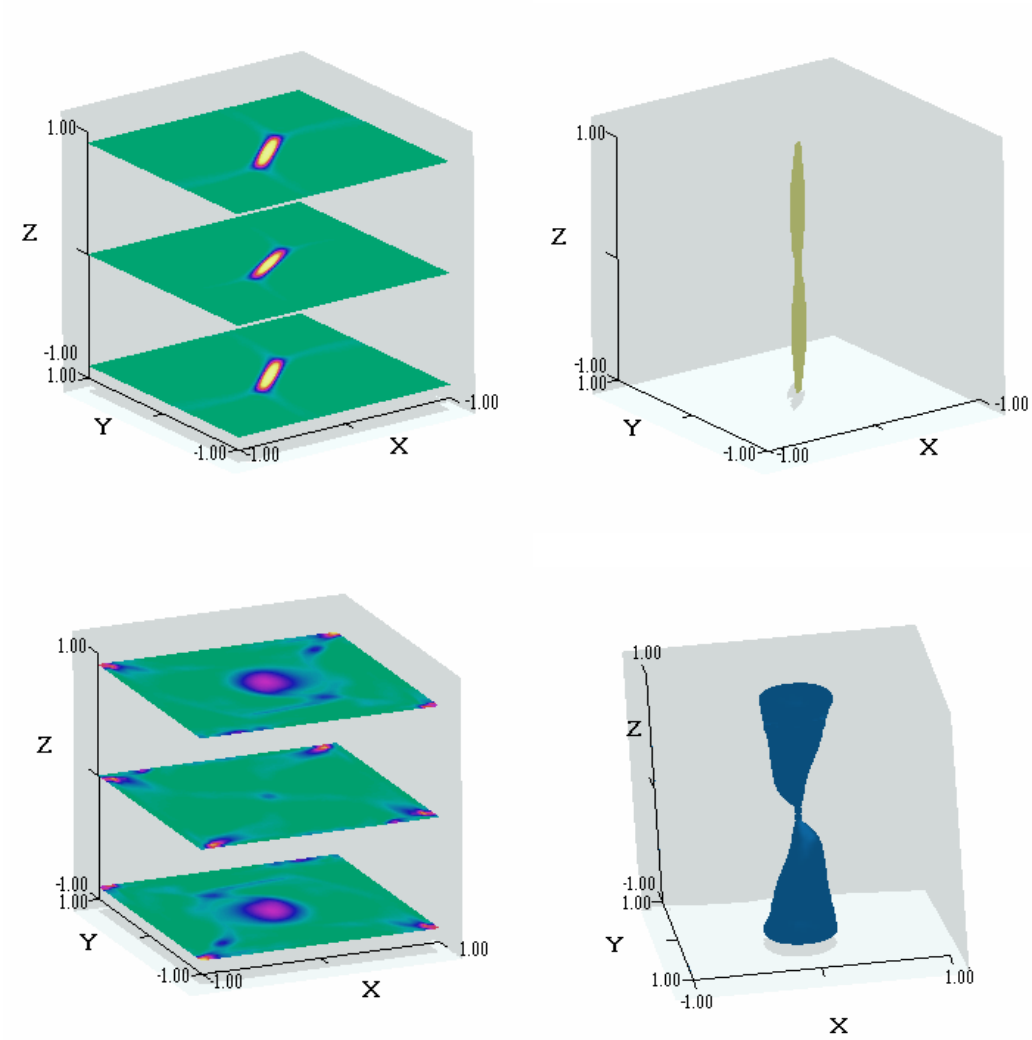


Вторая серия расчетов проводилась для магнитной конфигурации с параметрами a=0.25, b=-0.75. Сепаратрисная поверхность магнитного поля лежит в плоскости y=0. Возмущенная нулевая линия магнитного поля, направлена вдоль оси z.

Квазистационарная стадия достигается при t=4. На рисунке показана изоповерхность плотности электрического тока при t=8 и слайды распределения плотности электрического ток для различных значений z-координаты.. Видно формирование токового слоя в окрестности нулевой точки. В центральной части слоя токовый слой в основном направлен вдоль оси *z*. Токовый слой имеет характерную трехмерную форму.

Третья серия расчетов выполнена для магнитного поля, задаваемого формулой (11) с a=1.3 b=0.7. Сепаратрисная поверхность лежит в плоскости, и электрический ток, возбуждаемый на границе области, ей ортогонален. Рассматриваемая магнитная конфигурация представляет собой существенно неоднородную трехмерную конфигурацию.

Однако, в отличие от случая, когда электрический ток параллелен сепаратрисной поверхности, не происходит формирования токового слоя в окрестности нулевой точки. Ток сосредоточен в пространственно неоднородной области, вид которой показан на рисунке, где



представлена изоповерхность электрического тока.

Заключение.

Здесь приведены результаты первого численного моделирования локальной структуры перезамыкания магнитных силовых линий в пространственно неоднородном случае.

Однако сделаем акцент на проблему визуализации скалярных и векторных полей в данном случае. Минимальная размерность евклидова пространства, содержащего область определения поля, определяет сложность визуализации. Надо учитывать, что объекты представляющие интерес для исследователя существенно зависят от изучаемой задачи и для каждого конкретного случая при визуализации необходимо смещать акценты в зависимости от проблемы. Поэтому в визуализации сложных задач создаются специальные пакеты или модифицируются уже существующие.

В данном случае мы имеем дело с 4-х мерным пространством, задача визуализации усложняется наличием в системе, решаемых уравнений, двух векторных полей.

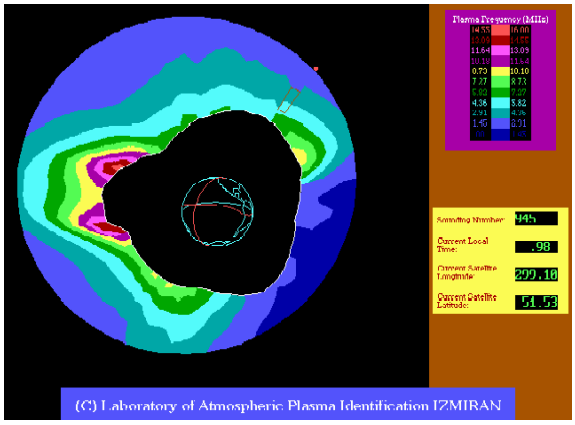
Для визуализации были использованы следующие программные пакеты: Matlab, Noesys, IDL, разработанный пакет Streamball. Как видно из представленных в работе рисунков различные способы визуализации несут на себе различные аспекты информативности. Например, по срезам распределения пространственной величины мы не можем представить детальную структуру распределения интересующей величины во всем пространстве. По распределению величины можно отследить области, требующие дальнейшего изучения.

В результате быстрого развития технологий и визуализации, визуализация является не вспомогательной областью науки, а полноправной научно исследовательской областью.

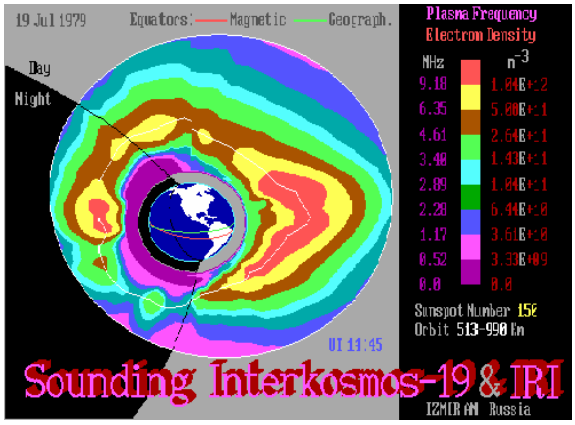
Компьютерная анимационная визуализация результатов томографии ионосферы по данным внешнего зондирования в КВ диапазоне, полученным на борту ИСЗ «Интеркосмос 19».

Шоя Л.Д.,
к.ф.-м.н., Зав. Лаборатории ИЗМИРАН, e-mail: shoya@izmiran.rssi.ru
Снеговой А.А.
к.ф.-м.н., доц. Московского технического университета связи, e-mail: fadin@mtu-net.ru

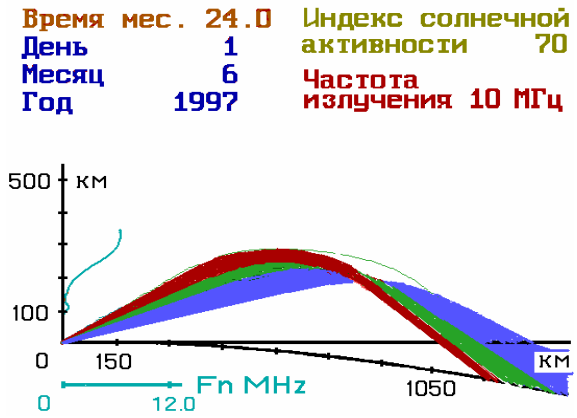
Результаты, представленные в данной работе были получены в Лаборатории идентификации атмосферной плазмы, созданной в 1979 г. в целях развития направления решения обратных задач радиозондирования ионосферы в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, РАН (ИЗМИРАН). В процессе этих исследований была доказана теорема о возможности разделения информации, содержащейся в вектор-функции ионограммы вертикального зондирования на информацию о долине и о горизонтальной неоднородности, что позволило разработать быстро сходящиеся алгоритмы восстановления пространственной структуры ионосферы



Кадр из фильма о динамике распределения плотности плазмы во внешней ионосфере, рассчитанной по данным КВ зондирования со спутника «ИНТЕРКОСМОС-19». Внешняя окружность обозначает орбиту с апогеем 1000 км над поверхностью Земли. Плотность плазмы раскрашена согласно шкале. Максимальная плотность - красный цвет. Радиальный масштаб изображения плотности плазмы увеличен. Солнце освещает Землю слева



Кадр из фильма о динамике глобальной ионосферы, построенного путем коррекции Международной глобальной ионосферы по данным внешнего зондирования. Солнце освещает Землю справа, ионизируя атмосферу. Наиболее обширная область максимальной плотности плазмы располагается над экватором на дневной стороне. Над северным полушарием видны облака желтого цвета (почти максимальная плотность), над южным - коричневого и зеленого (пониженная плотность после прохождения облаков через ночную область ионосферы).:



Программный комплекс расчета оптима-льных ионосферных каналов загоризон-тной КВ радиолокации и связи в геоме-трооптическом приближении с использо-ванием корректируемой Международной модели ионосферы IRI

Результаты применения разработанных методов на примере восстановления глобальной структуры ионосферы по данным спутника «Интеркосмос 19» были опубликованы в журнале «Доклады Академии Наук» в 1981 г. по представлению ИЗМИРАН, МГУ и ВЦ АН.

Развитие беспоисковых методов нахождения наилучших приближений на сплайнах позволило эффективно исключать ложные осцилляции математической модели структуры ионосферы и использовать полученные пространственные образы для точного расчета характеристик КВ сигналов при наклоннм распространении в декаметровом диапазоне. Экспериментальное подтверждение эффективности разработанных методов было получено в комплексном радиофизическом эксперименте, проведенном на европейской территории СССР в 1988 г. с участием 6 научных организаций СССР и доложено на Генеральной ассамблее URSI в Праге в 1990 г. Для восстановления пространственной структуры ионосферы по данным комплексного радиозондирования была разработана иерархия алгоритмов параллельных вычислений. В 1992 г. был создан первый геофизический фильм о динамике глобальной ионосферы, показанный в качестве иллюстрации к заказному докладу на Первой международной конференции по загоризонтному распространению радиоволн, проходившей в Техасском университете в 1994 г. Впервые было наглядно продемонстрировано существование собственных колебаний ионосферной плазмы, переходящих в волны, циркулирующие вокруг Земли, - процесс, играющий существенную роль в переносе энергии и массы от Солнца к Земле. Исследования оптимальных КВ каналов загоризонтной радиолокации и связи – основное научное направление лаборатории в настоящее время

Заключительное слово сопредседателя круглого стола А.Е.Бондарева
(*ИПМ им.М. В.Келдыша РАН***)**

Уважаемые коллеги, дорогие друзья !

Подводя итоги нашего обсуждения проблем развития НВ, можно надеяться, что научный обмен информацией в широком применении различных областей исследований взял свой старт и даст много плодотворных начинаний в совместных проектах и поисках изобразительных концепций визуального представления результатов. Остается ожидать, что сотрудничество исследователей прикладных наук со специалистами НВ в следующем году станет привычным явлением повсеместно.

Мы же благодарим организаторов ГРАФИКОНА и альма-матер - Московский университет за то, что он крепит учебную базу и готовит новые квалифицированные кадры для решения наших общих научных проблем в области визуализации не только по классическим учебникам, но и на материалах живых дискуссий, подобных нашей, радушно открывая свои двери перед ищущими знаний любого возраста.

Спасибо за ваше участие.