

УДК 519.634

## АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ КОНЦЕПЦИЙ И МЕТОДОВ ВИЗУАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ

© 2011 г. А. Е. Бондарев, В. А. Галактионов, В. М. Чечёткин

(125047 Москва, Миусская пл., 4, ИПМатем. РАН)

e-mail: bond@keldysh.ru; vlgal@gin.keldysh.ru; chech@gin.keldysh.ru

Поступила в редакцию 16.06.2010 г.

Обсуждаются основные стадии развития научной визуализации как научной дисциплины. Рассматривается эволюция и перспективы развития основных концепций, методов и подходов визуального представления результатов численных исследований задач вычислительной физики, в первую очередь задач механики жидкости и газа. Библ. 42. Фиг. 9.

**Ключевые слова:** научная визуализация, концепция визуального представления, методы визуализации, задачи вычислительной физики, задачи механики жидкости и газа, численные методы исследования.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Работа содержит авторский анализ эволюции и перспектив развития концепций и методов визуального представления результатов численных исследований задач вычислительной физики, в первую очередь в механике жидкости и газа. Данный анализ основан преимущественно на отечественных разработках в области научной визуализации.

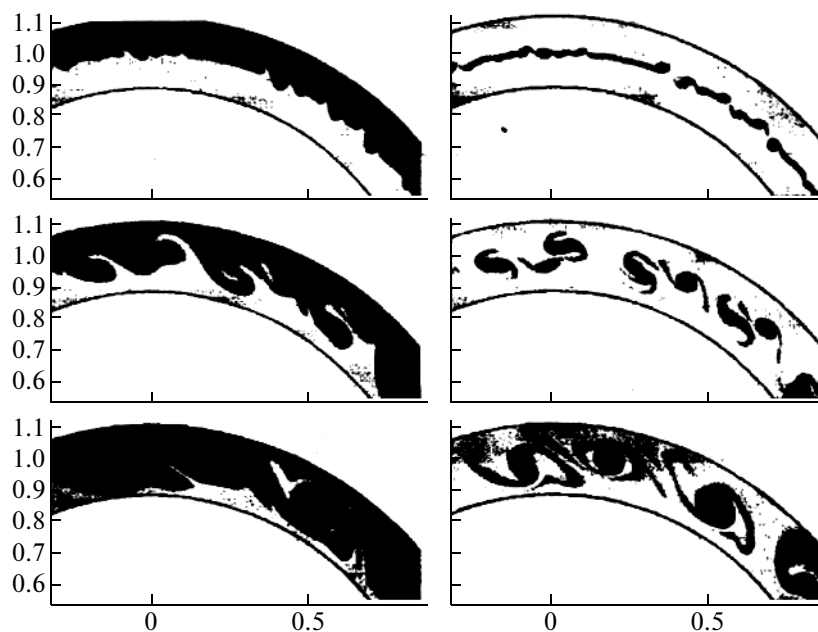
Интенсивное развитие вычислительной техники и методов математического моделирования сформировали новую научную дисциплину, которая получила название *научная визуализация* (scientific visualization). Развитие научной визуализации как самостоятельной дисциплины, востребованной во многих областях знания, науки и инженерных технологий, заняло два десятилетия. Это обусловлено тем, что развитие методов, алгоритмов и подходов визуального представления численных данных происходило на каждом этапе как ответ на реальные потребности науки и техники. Данное развитие соответствовало уровню сложности решаемых задач, уровню развития вычислительной техники, уровню развития математических методов.

Одновременно развивались концепции визуального представления численных данных, соответствуя когнитивному уровню и потребностям науки и техники в соответствующий период.

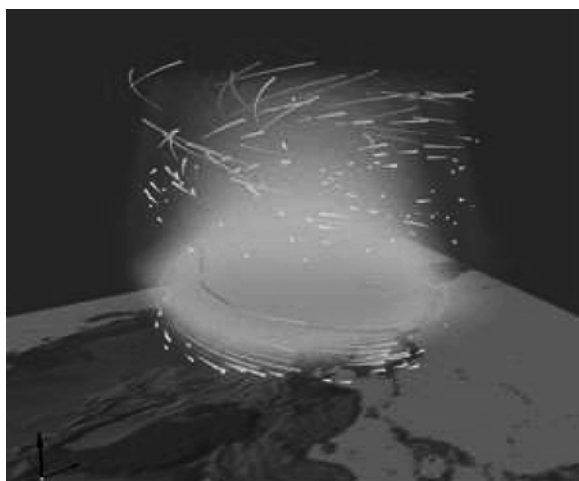
Функциональное превращение научной визуализации из иллюстративного средства в самостоятельный инструмент исследований в первую очередь было вызвано развитием вычислительной базы, появлением суперкомпьютеров, параллельных вычислений. Обилие результатов вычислений требовало новых инструментов для анализа численных данных. Без использования современных концепций, методов и программных средств научной визуализации невозможно провести полный и достоверный анализ результатов численного моделирования сложных физических и технологических процессов, проводимый на современной вычислительной технике. В настоящее время, когда число задач, решаемых на суперкомпьютерах с помощью параллельных вычислений, неуклонно растет, значение развития и разработки современных концепций и методов визуального представления численных данных становится все более актуальным.

Методы, алгоритмы и программные средства научной визуализации позволяют проводить анализ вычислительных результатов в процессе расчета в самом широком спектре как теоретических задач механики жидкости и газа, так и разнообразных практических приложений. Примеры такого применения проиллюстрированы фиг. 1 и 2.

Использование средств научной визуализации при решении задач вычислительной физики на сегодняшний день становится необходимым условием успешной реализации вычислительного эксперимента.



Фиг. 1. Быстрое развитие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца (см. [41]).



Фиг. 2. Модельные данные циклона: аномалии давления и ветер в циклоне (см. [42]).

Данная работа рассматривает процесс формирования научной визуализации как отдельной дисциплины и эволюции концепций визуального представления численных данных. Также рассматриваются современные потребности и перспективные направления разработок методов визуального представления.

## 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КАК ОТДЕЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Термин научная визуализация понятен на интуитивном уровне; всем ясно, что речь идет о визуальном представлении результатов научных исследований с помощью средств компьютерной графики.

Научная визуализация переводит результаты научных исследований, выраженные в численной форме, в визуальные образы. Визуальное представление численных данных облегчает работу

с информацией и обмен этой информацией. Но главная цель — увидеть то, что раньше нельзя было увидеть, иначе говоря, увидеть невидимое.

Увидеть невидимое хотели всегда — задолго до появления компьютеров. Большая часть экспериментов в физике, механике жидкости и газа, теории упругости имела своей целью не только получить и измерить количественные характеристики явления, но и увидеть их, сделать физические процессы видимыми. Можно вспомнить в ядерной физике камеру Вильсона, в которой исследуются траектории ядерных частиц с использованием фотографий этого явления. Можно вспомнить экспериментальные работы в механике жидкости и газа, где использовалось подкрашивание ламинарных потоков в каналах, наклеивание длинных шелковых нитей на модели и макеты, размещаемые в аэродинамических трубах, инжекция в газовые потоки струек дыма и гелиевых пузырей (см. [1]).

Существует аналогия между численным и физическим экспериментом. В физическом эксперименте во многих случаях именно оптическая картинка является основным первичным результатом исследований. В области аэродинамики фотография картины обтекания является основным или единственным первичным результатом исследований на некоторых экспериментальных установках. В испытательных камерах аэробаллистических установок производится искровая фотография модели с применением теневого прибора, прибора Теплера или с применением интерферометра. Эта фотография часто является единственным первичным результатом эксперимента. 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 (см. [2]) реагирует на первую производную плотности, а интерферометр реагирует на саму величину плотности и позволяет выделить линии равной плотности.

Отметим, что задолго до появления компьютеров и численных экспериментов сама суть получения результата в физическом эксперименте была основана на анализе поля течения, отражающемся в действии экспериментального прибора. Основные положения, результаты и постулаты механики жидкости и газа были во многом получены таким экспериментальным путем. Многие из них отражены в известном альбоме течений жидкости и газа Ван-Дайка (см. [3]).

Физическая визуализация в экспериментах была основным источником информации о явлениях и процессах до появления математического моделирования. С появлением и развитием численного эксперимента, который стал более дешевым и маневренным инструментом познания физической картины мира, физический эксперимент остался основным средством контроля и верификации численных исследований. Продолжают развиваться разнообразные экспериментальные методы визуализации прозрачных сред (см., например, [4]). Согласно [4], задачей визуализации неоднородностей в прозрачных средах является преобразование изменений фазы проходящего через эти среды волнового фронта в изменения освещенности изображения исследуемого объекта, которые можно зарегистрировать. Достоинствами оптических методов являются бесконтактность применения, отсутствие влияния на параметры исследуемого явления, высокая чувствительность.

С появлением компьютеров возникла возможность проводить вычислительные эксперименты, основанные на численном решении уравнений, используемых в математической модели исследуемого физического явления или процесса.

Роль методов и алгоритмов визуального представления результатов численного моделирования в вычислительной физике изначально рассматривалась как вспомогательная. Визуализация имела две основные вспомогательные функции:

- а) обеспечение контроля и лучшего понимания численных результатов;
- б) иллюстративная функция, облегчающая запоминание и ориентацию в обсуждениях и дискуссиях.

В настоящее время из иллюстративного и по своим функциям вспомогательного инструмента научная визуализация превращается в полноправный инструмент познания, более того, зачастую становится единственным инструментом, способным прояснить суть моделируемого физического процесса.

Реальное рождение научной визуализации и компьютерной графики было обусловлено появлением во второй половине XX века графопостроителей. Это дало возможность не только автоматически представлять графики на бумаге, но и породило развитие программных средств визуального представления численных данных. Именно в это время появляются такие пакеты графи-

ческих программ как Графор (см. [5]), СМОГ (см. [6]), GINO 3D (см. [7]), Plot10. Начинается развитие программного обеспечения, позволяющего представлять результаты научной и конструкторской работы визуально.

На этом этапе в вычислительной механике жидкости и газа решались трехмерные стационарные задачи и двумерные задачи, носящие хотя и нестационарный характер, но устанавливающиеся в процессе расчета к устойчивой картине течения. Появившаяся возможность графического представления этих решений привела к развитию инструментов визуализации.

Необходимо отметить неопределимую роль для развития отечественной науки и техники в советский период, которую сыграл программный комплекс Графор, разработанный в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН под руководством Ю.М. Баяковского. Представленный в виде библиотек программный комплекс позволял квалифицированному пользователю не только иметь первичный инструментальный для визуального представления двумерных результатов и одномерных графиков функций, но и реализовывать на его основе собственные надстройки, позволяющие визуализацию широкого круга задач в самых различных областях знания.

Однако с течением времени по мере совершенствования вычислительной техники и усложнения решаемых задач стало очевидно, что для получения реального результата уже нельзя сначала просто рассчитать его, а потом применить изобразительные средства. Стало понятно, что применение и развитие средств визуального представления численных данных является самостоятельной ветвью науки, необходимой во многих других областях знания.

Принято считать, что началом формирования научной визуализации как научной дисциплины является 1987 год. К середине 1980-х годов в США было создано несколько суперкомпьютерных центров. Существующие на тот период средства визуального представления не могли обеспечить обработку, анализ и восприятие огромных массивов данных, продуцируемых суперкомпьютерами. В 1987 г. при поддержке Национального научного фонда США (NSF) и по инициативе ACM SIGGRAPH в IEEE Computer Society была организована дискуссия по проблеме визуального представления научных данных и результатов расчетов, где были сформулированы основные задачи и направления развития научной визуализации. В этом же году Национальным научным фондом США была опубликована Инициатива ViSC (Visualization in Scientific Computing), нацеленная на создание систем визуализации (см. [8]). Эти события положили начало развитию отдельной научной дисциплины – научной визуализации, обладающей своими научными форумами, своими органами научной печати, своими профессиональными сообществами.

На современном этапе параллельно с развитием средств компьютерной техники значительно усложнились задачи вычислительной физики. Это, как правило, двумерные и трехмерные нестационарные задачи, обладающие сложной геометрией. Часто подобные задачи предполагают слияние различных физических и математических моделей. Данные математические модели могут быть реализованы на сложных неструктурированных сеточных разбиениях. Особое значение получают алгоритмы решения обратных задач, имеющих своей целью оптимизацию явлений, процессов, определяющих параметров задачи, различных конструктивных параметров и т.п. Эти задачи предъявляют совершенно новые требования к роли визуализации в процессах численного решения задач математической физики.

Следует особо отметить, что развитие программных средств визуализации всегда носило догоняющий характер. Визуальное представление численных решений в первую очередь зависело от возможностей вычислительных ресурсов и только во вторую – от уровня решаемых задач математического моделирования и используемых при этом численных методов.

В попытках определить новые пути развития визуализации в рамках международной конференции по компьютерной графике ГРАФИКОН были организованы круглые столы по проблеме развития и применения научной визуализации в прикладных задачах (см. [9], [10]). Было отмечено, что с развитием вычислительных средств, математических методов и сложности решаемых задач изменилась основная цель применения средств визуального представления: не проиллюстрировать уже полученный результат, а получить и понять его с помощью методов и подходов научной визуализации. Также отмечалось, что одной из важных функций научной визуализации является сохранение и накопление научного опыта решения задач в различных областях науки и техники.

Одним из важнейших результатов данных форумов было обсуждение выработки общих критериев визуального представления. Был выдвинут и поддержан следующий тезис: Необходимым признаком научной визуализации является наличие визуальной концепции. Подобно тому, как по мере развития вычислительных средств исследователю было необходимо обосновывать физи-

ческую и математическую модели явления, выбор численного метода, счетной области, сеточного разбиения, так сейчас и в будущем необходимо заранее разрабатывать и обосновывать визуальную концепцию будущего представления и анализа результатов. Было введено важное понятие — информационной ценности визуального образа. Наряду с выразительностью и корректным отображением физического явления или процесса визуальный образ должен обладать информационной ценностью для исследователя.

### 3. РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИЙ ВИЗУАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

Параллельно развитию вычислительных средств и математических методов и усложнению задач науки и инженерии шло развитие концепций визуального представления численных данных.

В период, когда в вычислительной математике и прикладных областях рассматривались в основном двумерные стационарные и нестационарные задачи, концепция визуального представления численных решений этих задач была предельно проста. Ее можно сформулировать следующим образом. Полученные в расчетах данные существуют в виде двумерных полей скалярных или векторных величин. Эти двумерные поля изображаются соответствующими программными средствами: скалярные поля — в виде изолиний или цветового представления пространства между изолиниями, векторные поля изображаются стрелками со своим масштабом и направлением, соответствующими представляемой векторной величине, а также линиями тока. В определенный период эта концепция удовлетворяла прикладным целям и задачам. Дальнейшая детализация визуального представления была возможна путем различных комбинаций в рамках данной концепции.

Недостатком этой концепции являлось то, что коллективы ученых, конструкторов, инженеров и коллективы разработчиков средств визуализации существовали как бы раздельно. Это существенно мешало развитию.

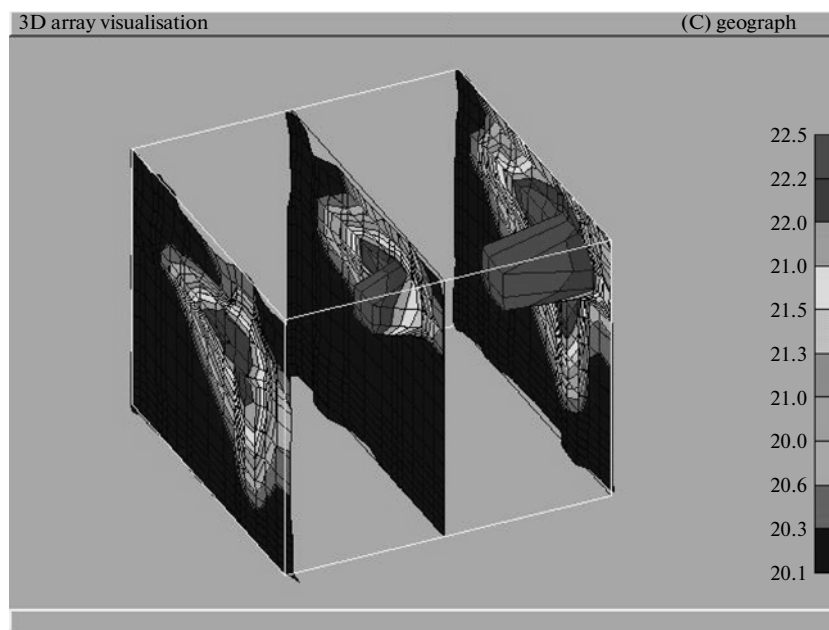
Основные принципы построения системы визуализации для анализа двумерных скалярных и векторных полей были успешно сформулированы в [11]. Также в этой работе было перечислено необходимое функциональное содержание подобной системы визуализации.

При усложнении алгоритмов и задач даже для двумерных данных рамки описанной выше концепции оказались тесны. Требовалось расширить возможность работы с двумерными данными. Стандартное представление двумерного скалярного поля в виде трехмерной поверхности  $F(x, y)$  также не позволяло в полной мере выразить структуру полученных расчетных данных. Предлагались различные способы квазитрехмерного визуального представления двумерных данных (см. [12]). Основной целью являлось расширение рамок двумерной концепции. Для задач, обладающих осевой симметрией, предлагался следующий вариант псевдотрехмерного представления: создать из двумерной сетки трехмерную фигуру вращения и получить таким образом полезное трехмерное представление двумерной задачи. Другим предложенным решением было последовательно расположить перпендикулярно оси времени набор двумерных сечений, взятых в разные моменты времени, и, соединив изолинии соседних сечений по времени, получить некую квазитрехмерную картину. Предлагался и следующий подход. Пусть распределение скалярной величины  $A$  будет фоном, на нем представим линиями тока векторную величину  $B$ , толщина этих линий будет отображать скалярную величину  $C$ , вдоль линий тока цветом изображается распределение величины  $D$ , вспыхивающими маркерами представляется  $E$ , и т.д. (см. [12]).

Основная проблема состояла в том, что практическая реализация подобных подходов продуцировала либо абсолютно нефизичную, искусственную картину, либо образ, перегруженный избыточной нескомпонованной информацией.

В период, когда задачи математической физики, математического моделирования, инженерные задачи в прикладных областях стали по большей части трехмерными и нестационарными, в научной визуализации произошла естественная попытка автоматически перенести концепцию визуального представления двумерных данных на трехмерный случай, а также автоматически перенести на трехмерный случай уже разработанные методы визуального представления. Естественно, визуальное представление трехмерных нестационарных процессов имело свою специфику и сразу выявило ряд проблем.

В [13] описаны традиционные методы визуального представления численных решений трехмерных нестационарных задач для такой области знания, как вычислительная аэрогазодинамика. Трехмерность моделируемого нестационарного процесса создает существенные трудности для визуального представления результатов, особенно там, где вычислитель не обладает априорной информацией о характере течения. Современные трехмерные нестационарные задачи вы-



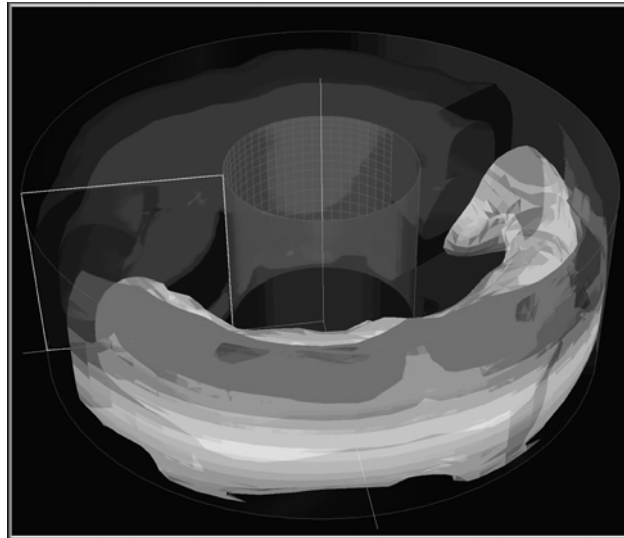
**Фиг. 3.** Комбинированное представление – сочетание распределения температур в параллельных сечениях с поверхностями, “натянутыми” на векторы скорости (см. [13]).

числительной физики во многом напоминают задачи “черного ящика”, когда без применения средств визуального представления и контроля получаемых в процессе расчета результатов даже опытному расчетчику трудно полноценно представить, что же в счетной области происходит. Таким образом, для представления решения трехмерной задачи необходимо использование комбинированных алгоритмов и подходов графического представления (фиг. 3), иначе обеспечить понимание качественной картины течения сложно.

В попытке преодолеть ограничения, накладываемые автоматическим переносом двумерной концепции визуального представления на трехмерный случай, создавались вычислительные комплексы, ориентированные на конкретный класс задач. Эти комплексы обладали модулями научной визуализации, позволяющими покрывать все возможные потребности вычислителя в данном ограниченном классе задач. В подобные модули стремились сконцентрировать все существующие средства визуального представления численных данных и все возможные комбинации этих средств.

Успешный пример реализации такого подхода представляет собой информационно-вычислительная система, описанная в [14], предназначенная для моделирования двумерных и трехмерных нестационарных задач вычислительной гидродинамики. В этой системе реализовано построение сложных композиционных сцен, отражающих расчеты с качественным рендерингом изображений граничных поверхностей, изоповерхностей. Реализована возможность построения сечений, отражающих структуру расчетных сеток, изолиний, 2D-графиков, векторных полей. Реализована возможность расчета треков отмеченных частиц (маркеров) в контрольном объеме для выяснения топологии сложных течений. Для визуализации скалярных полей существует возможность 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 (фиг. 4). Использование маркеров жидких частиц дает возможность анимации движения потока жидкости с выделением локальных особенностей.

Несмотря на интенсивное развитие в различных классах задач подобных систем, они не могли решить многие проблемы, появившиеся по мере дальнейшего развития вычислительной техники и вычислительных методов. Надо отметить, что зачастую стремление реализовать все имеющиеся средства визуального представления результатов приводило к информационной перегруженности образов. Это существенно понижало информационную ценность визуальных образов для исследователей и пользователей, несмотря на выдающуюся выразительность и привлекательность.



**Фиг. 4.** Изотахи. На изоповерхностях осевой компоненты скорости нанесены карты распределения температуры с цветовой индикацией ее значений (см. [14]).

Появлявшиеся новые задачи, численные методы, алгоритмы и подходы, обусловленные развитием вычислительной базы, требовали новых подходов к визуализации данных. Однако эти новые требования не могли быть удовлетворены в рамках старых концепций визуального представления.

Для решения практических конструкторских задач было недостаточно моделировать и визуализировать поле течения в стандартных представлениях. В практических задачах важны конкретные параметры для исследуемого класса задач, определяемого конструкторской целью. Необходимо визуальное представление именно этих параметров и прослеживание их изменений в зависимости от вариации тех или иных условий. Как правило, практическая задача заключается в выборе нужных вариантов из множества допустимых. Это может быть выбор геометрической формы (минимальное сопротивление), выбор управления течением (максимальное смещение) и т.д. Во многих случаях эти задачи ставятся в оптимизационном виде. Стандартные системы визуального представления давали информацию, которая с точки зрения ее практического использования являлась, с одной стороны, сверхизбыточной, а с другой стороны – недостаточной.

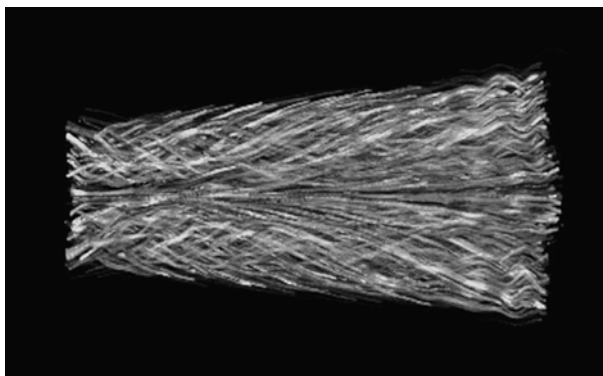
Необходимы были новые визуальные концепции, позволявшие отойти от стандартных представлений о научной визуализации, как о графическом отображении наборов скалярных и векторных полей. Необходимы были новые подходы, которые могли бы в своем развитии обеспечить реальные современные потребности научных исследований и инженерных технологий.

#### 4. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ КОНЦЕПЦИЙ И МЕТОДОВ ВИЗУАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

Развитие новых подходов к визуализации шло по разным направлениям. Современные методы визуального представления численных данных можно с известной долей условности разделить на две группы:

- 1) методы, основанные на повышении выразительности визуального образа (ниже будем их называть *методы выразительности*);
- 2) методы, основанные на анализе данных (ниже будем их называть *методы анализа данных*).

Отдельную группу необходимо выделить подходы, связанные с произошедшим за последнее десятилетие интенсивным развитием вычислительной техники. Это явление открывает новые возможности визуального представления численных данных, но порождает новые проблемы. Упомянутые подходы основаны на организации возможности применения уже разработанных ранее методов, алгоритмов, программных средств на новой вычислительной технике, на реализации сочетания имеющихся методов с новыми вычислительными возможностями. Следует от-



Фиг. 5. Представление линий тока в трехмерном течении с помощью LIC-метода (см. [19]).

метить, что эта группа подходов, как правило, не содержит в себе новых концепций и методов визуального представления, но стремится приспособить известные методы к новой технике.

#### 4.1. Методы выразительности

Описываемая группа методов имеет одно общее свойство: они посвящены решению конкретных проблем, возникающих при определенных визуальных представлениях, с помощью усиления и повышения выразительности результирующего образа. Простой и убедительный прием повышения выразительности образа предложен в [15], где рассматриваются проблемы визуализации течений жидкости с изменчивой пространственно-временной структурой в объеме. В качестве примера рассматривается задача свободной конвекции жидкости в полости с локальным теплообменом на горизонтальных поверхностях. Решение фундаментальной проблемы научной визуализации достигается выделением структурных элементов течения в сочетании с анимацией. В [15] отмечается, что для визуального представления течения жидкости необходимо введение искусственных поверхностей, позволяющих увидеть само движение. В рассматриваемом течении такой поверхностью служит изоповерхность нейтральной температуры. Использование нелинейной зависимости между интенсивностью цвета и температуры позволяет четко выделить границу между областями, занятыми теплой и холодной жидкостями, формируя у зрителя искусственное представление о наличии в объеме двух жидкостей с резкой границей раздела.

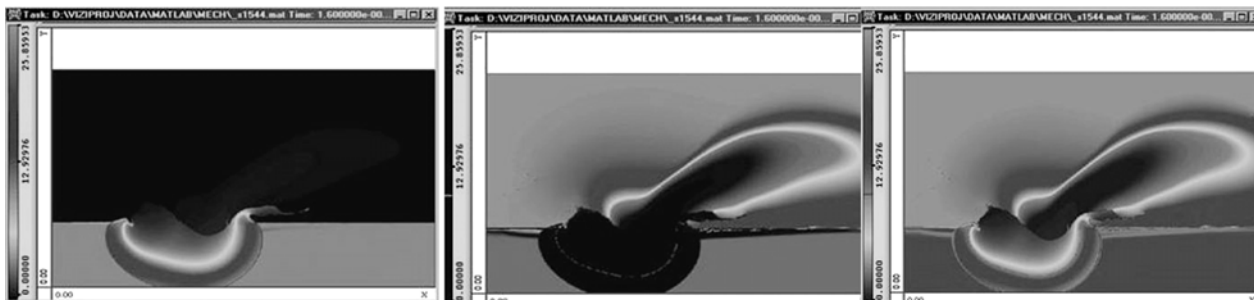
Важным направлением среди методов визуального представления векторных полей является группа многочастичных анимационных методов (см. [16]; МЧА-методы). Они основываются на визуальном представлении движения множества маркеров в объектном пространстве. В [17] предложен единый подход к рассмотрению и реализации МЧА-методов визуального представления векторных полей. Он заключается в следующем. Рассматривается расчетная область произвольной формы. Внутри области по некоторому правилу задается конечное множество точек, каждой из них ставится в соответствие маркер. Это — точки рождения маркеров. В данном подходе маркер определен своей точкой рождения, временем жизни и жизненным объемом. Большинство разнообразных МЧА-методов можно рассматривать как частные случаи описанного выше подхода с варьирующимися правилами задания параметров маркера.

Другим важным направлением усиления выразительности визуальных образов являются текстурные методы, основанные на LIC-методе (Line Integral Convolution). Основы LIC-метода и его модификаций, предназначенных для визуального представления двумерных и трехмерных векторных полей, подробно описаны в [18]. Выразительный и многофункциональный LIC-метод успешно применяется для рисования линий и трубок тока в трехмерной области. Данный подход помогает представить трехмерную глубину и ориентацию взаимоналагающихся линий тока. Фиг. 5 показывает пример применения LIC-метода к трехмерному течению.

В сочетании с комбинациями толщины линий тока и цвета данный подход улучшает восприятие характеристик трехмерного течения. Использование текстур, ориентированных вдоль направления течения, совместно с их анимацией позволяет передавать достаточно полную информацию о течении (см. [20]).

Перечисленные выше подходы обладают одним общим свойством: с помощью того или иного приема они создают иллюзию зрительного восприятия физического явления или процесса,





**Фиг. 6.** Представление скалярного поля цветными изолиниями с разными законами соответствия между цветом и распределением величины в диапазоне (см. [21]).

вполне согласующуюся с исходным набором численных данных и физическими законами. При этом сам исходный набор численных результатов, к которому применяются подобные подходы, никак не затрагивается.

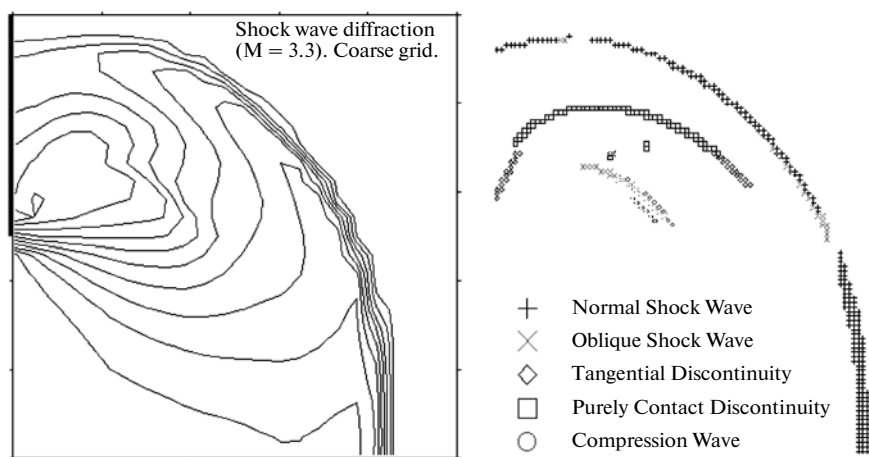
Необходимо подчеркнуть тот факт, что, несмотря на внешнюю выразительность образов и на видимые преимущества в исследованиях тонких топологий численных решений, методы выразительности до недавнего времени не находили применения в современных коммерческих программных пакетах визуализации. Причиной этому называют математическую сложность этих методов и высокие вычислительные затраты. Эти аргументы при нынешнем росте возможностей вычислительной техники не представляются существенными. Скорее всего, дело заключается в том, что сами по себе результаты визуального представления, полученные при помощи методов выразительности, имеют невысокую информационную ценность, несмотря на внешнюю привлекательность. Сочетание с другими методами и подходами может существенно повысить информативность подобных методов.

#### 4.2. Методы анализа данных

Описываемая группа методов также имеет одно общее свойство: достижение новых результатов с помощью препроцессингового, параллельного расчета, или дополнительного анализа основного поля данных. Как правило, такой подход позволяет применение известного и разработанного в других областях знания мощного математического аппарата. Суть этой концепции визуального представления можно сформулировать так: получение основного поля данных для визуального представления; дополнительный анализ и обработка основного поля данных; получение новой информации как результата дополнительного анализа и обработки; применение средств визуализации к полученной новой информации и к основному полю данных. Подобная концепция имеет разные формы и методы применения и реализуется в самых разных направлениях.

Простой, красивый и эффективный метод, основанный на анализе данных, был предложен в [21]. При визуальном представлении скалярного поля при помощи тоновой заливки задается закон, устанавливающий соответствие между цветами палитры и диапазоном изменения представляемой скалярной величины. При линейном задании этого закона можно потерять существенную часть информации о решении, особенно в областях сильных изменений величины в узких зонах. Во избежание этого проводится статистический анализ распределения значений изображаемой величины с целью определения нового закона соответствия, что помогает визуально представить полученное решение без потери ценной информации (фиг. 6).

Другой способ выделения структур в решении, основанный на применении алгоритмов обработки изображений к полю данных, полученных в процессе решения задач математической физики, предложен в [22]. Цель данного подхода состоит в автоматизации обработки результатов проведенного численного моделирования газодинамического течения для получения структуры его сильных разрывов. В данном подходе газодинамические функции рассматриваются как интенсивность изображения, а значения функций в каждой точке как элементы изображения (пиксели). Применяется детектор перепадов, и проводится классификация обнаруживаемого разрыва при помощи дискретных аналогов газодинамических соотношений, выполняемых на разрыве. Пример применения подобного подхода к распознаванию разрывов представлен на фиг. 7.



Фиг. 7. Линии равной плотности и точки разрывов, полученные в процессе распознавания (см. [22]).

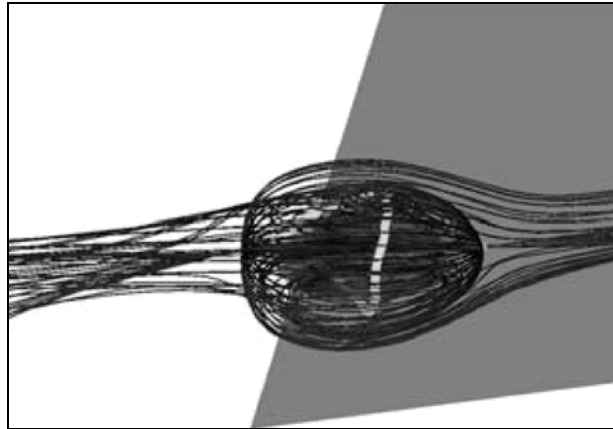
Изложенный подход не зависит от конкретного вида решаемой задачи и не требует никакой априорной информации о течении. Он применим к результатам расчетов, полученных любым методом сквозного счета, ускоряет обработку результатов численного моделирования, а также повышает объективность интерпретации получаемых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

Это направление получило дальнейшее развитие с применением мощного современного математического аппарата вейвлет-анализа. Работа [23] посвящена выделению и классификации сингулярностей газодинамических полей — ударных волн, слабых и контактных разрывов. Алгоритм из [23] основан на разложении исходных газодинамических полей по вейвлетным базисам с последующим анализом полученных коэффициентов.

Одним из важных направлений исследования пространственно-временных структур в поле численного решения является анализ зон циркуляционного течения. Подобные ситуации возникают при обтекании потоком препятствий, при взаимодействии струй и во многих других случаях. В нестационарных задачах нужно проследить не только наличие циркуляционной (вихревой) зоны, но и отслеживать ее развитие во времени: процесс зарождения, развития и распада вихря. В [24] предложен подход обнаружения и прослеживания центра вихря в расчетной области, основанный на анализе собственных значений якобиана матрицы компонент скорости. Этот метод был успешно применен к ряду задач. В [25] он был обобщен на случай вязких течений и применен к исследованию развития циркуляционных зон в задаче о взаимодействии вязкого потока со спутной струей. Трассировка центров вихрей в процессе моделирования течения позволяет следить за эволюционной картиной течения. Данное направление развивается в [26], где исследуются процессы анализа и визуализации вихревых течений с помощью топологических методов. Подход из [26] позволяет эффективно проследить критические точки течения, контролировать нестационарные процессы зарождения и распада вихрей в потоке (фиг. 8).

Подход, представленный в [27], предлагает проводить визуальное представление не только параметров основного поля результатов расчетов, но и при решении сопряженных задач получать новую дополнительную информацию из визуального представления сопряженных параметров. В задачах управления течением, идентификации течения сопряженные параметры используются для расчета градиента целевого функционала. Визуализация сопряженных параметров в этих задачах может быть, естественно, использована для поиска зон наиболее эффективного контроля или для выбора зон измерения. Поле сопряженных параметров позволяет рассчитать и визуализировать вклады ошибки исходных данных, ошибки физической модели и погрешности дискретизации в погрешность целевого функционала. Это может использоваться для уменьшения погрешности и для получения решения с необходимой гарантированной точностью.

Еще одним важным направлением среди методов, базирующихся на анализе данных, является метод из [28]. Данный метод рассматривает проблемы визуального представления определяющих параметров задач оптимизации, основывающихся на решении обратных задач. В общем, в практических целях обратные задачи формулируются следующим образом: найти при каких определяющих параметрах в классе задач будет возникать интересное практического иссле-



Фиг. 8. Детализация процесса вихреобразования на кромке дельтовидного крыла (см. [26]).

дователя явление. Определяющие параметры варьируются до наступления события (физического эффекта) в процессе многократного расчета обратных задач. Результирующие взаимозависимости определяющих параметров представляются визуально в виде поверхностей, объемов, к которым можно применить геометрические преобразования. Рассматривая пространство определяющих параметров как набор базисных векторов, обратная задача формулируется как нахождение в этом пространстве всех подобластей, где событие наступило. Подобная постановка важна с точки зрения выработки визуальной концепции для построения визуального представления решений обратных задач. Организация многократного расчета обратной задачи соответствует идеологии многопроцессорных параллельных расчетов. Данный методологический подход был успешно применен в [28] для оптимизации вычислительных свойств гибридных разностных схем (в качестве события рассматривалось возникновение нежелательных осцилляций).

Особым и крайне важным направлением является развитие систем визуального представления экспериментальных данных, которые помогают накапливать, верифицировать, сравнивать и представлять экспериментальные данные различных типов. Прототип подобной системы ExVis (Exploratory Visualization) был описан в [29], где приведены основные принципы построения и функционального наполнения подобной системы, способной оперировать с большими объемами экспериментальных и вычислительных данных.

Многочисленные и разнообразные методы, перечисленные выше, имеют важную общую черту: они позволяют извлекать новую информацию из обыкновенных стандартных наборов численных данных в практических приложениях. Методы анализа данных необходимы при обработке огромных численных массивов, продуцируемых современной вычислительной техникой, что обуславливает огромный потенциал их дальнейшего развития, особенно в сочетании с применением методов выразительности.

#### 4.3. Подходы, обеспечивающие соответствие современной вычислительной технике

В отдельную группу, как было указано в начале данного раздела, необходимо выделить подходы к визуальному представлению данных и получению численных решений, основанные на использовании новых возможностей вычислительной техники. Типичным примером таких подходов можно назвать подход из [30], где содержатся принципы и пример организации компьютерной виртуальной лаборатории на базе возможностей персональных компьютеров. Компьютерная лаборатория COMGA (см. [30]) включает исследование задач вынужденной, естественной и термокапиллярной конвекции несжимаемой жидкости на базе уравнений Навье—Стокса в приближении Буссинеска в областях простой формы. Визуализация данных играет важную роль на всех этапах решения задачи.

Другим важнейшим на сегодняшний день направлением являются работы по организации визуального представления численных данных с помощью высокопроизводительной вычислительной техники — параллельных вычислительных систем. В качестве примеров успешных разработок в этой области можно привести разработки из [31], [32]. Здесь основной задачей является организация отображения результатов с помощью традиционных методов визуализации при

ограниченной пропускной способности каналов связи между рабочей станцией пользователя и суперкомпьютером для получения данных. Система, описанная в [30], призвана разрешить эти проблемы путем организации оптимального потока данных между пользователем и суперкомпьютером.

Отдельным важным направлением развития систем научной визуализации является создание систем виртуального окружения (виртуальной реальности). Подобные системы дают возможность исследовать сложные физические процессы. Пользователь в подобных системах может не только исследовать моделируемое явление изнутри, входя в искусственный мир исследуемого явления, но и влиять на это явление напрямую, работая с данными в пространстве модели. Первая система такого рода CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) была разработана в 1992 г. и представлена на конференции ACM SIGGRAPH'93 (см. [33]). Это направление активно развивается. На сегодняшний день системы типа CAVE, применяемые к различным классам задач науки и техники, исчисляются сотнями. Примерами успешной реализации систем виртуального окружения можно назвать работу [34], описывающую визуальное представление 3D объектов с физически аккуратной картиной глобальной освещенности с учетом изменения объектов в режиме реального времени, и работу [35], представляющую собой программно-аппаратный комплекс виртуальной презентации, обеспечивающий формирование виртуальных сред различной тематической направленности в комбинации с видеоизображением реальных персонажей, осуществляющих непосредственное взаимодействие с моделями. Число подобных систем, ориентированных на разные классы задач, постоянно растет.

Дальнейшее развитие вычислительной техники и появление новых устройств, расширяющих возможности человека работать с представлениями численных данных, ставит задачи как адаптации уже существующих методов к новым техническим возможностям, так и разработки новых методов и алгоритмов для работы с новой техникой.

## 5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОНЦЕПЦИЙ И МЕТОДОВ ВИЗУАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

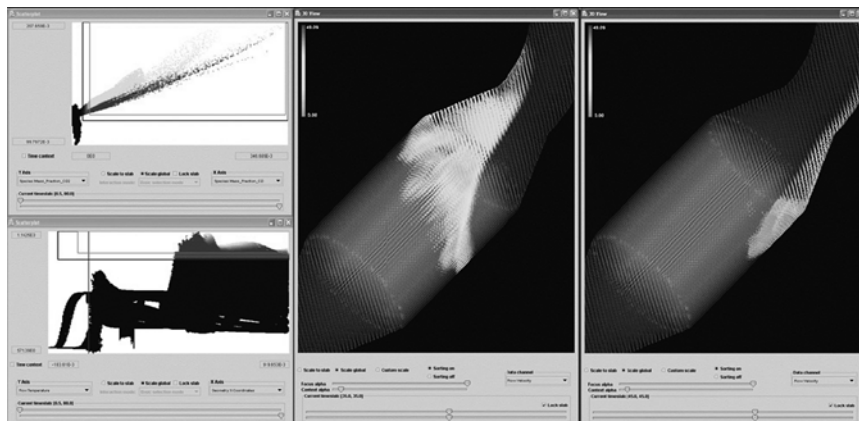
По мере роста возможностей высокопроизводительных вычислений будут исследоваться все более сложные задачи и, следовательно, будут развиваться математические методы вычислений и математический аппарат в целом. Именно это обстоятельство будет определять основные направления развития и будущие задачи научной визуализации. Многие направления были отмечены в совместном докладе Национального научного фонда США (NSF) и Национального института здоровья (NIH), посвященном проблемам будущего научной визуализации (см. [36]).

Одним из необходимых условий дальнейшего развития научной визуализации станет адаптация существующих концепций, методов и подходов визуального представления численных данных к применению на высокопроизводительной технике — параллельных вычислительных системах. Здесь основная задача — сохранение наработанного опыта и перенос его на высокопроизводительные вычислительные системы.

Основным направлением развития концепций и методов визуального представления численных данных становится дальнейшая разработка методов анализа данных, их расширение на другие прикладные области и синтез с методами выразительности (см. [37]).

Важным направлением, имеющим в будущем большое значение, становится развитие систем обучаемости — создание в классах задач баз экспериментальных и расчетных данных в численной и визуальной форме, позволяющих хранение, накопление, обработку и сравнение результатов в автоматизированном режиме. Развитие в разных областях знания и в разных классах задач подобных систем, прообразом которых может служить ExVis (см. [29]), позволит резко ускорить и качественно улучшить процессы верификации и валидации результатов, как вновь полученных, так и накопленных ранее.

Еще одним важным направлением развития систем визуализации станет развитие систем обеспечения возможности анализа и контроля сложного физического или технологического процесса с разных ракурсов, разных величин в разные отрезки времени в автоматическом режиме. Организация подобных систем, обеспечивающих, подобно автоматическим датчикам слежения, контроль расчетного процесса математического моделирования физического явления должна сыграть важную роль в научных исследованиях. Примером такой системы может служить работа [38], рассматривающая интерактивный визуальный анализ и контроль системы выпуска газов дизельного двигателя (фиг. 9).



Фиг. 9. Моделирование нестационарных процессов в системе выпуска газов дизельного двигателя (см. [38]).

В связи с этим становится очень важным и актуальным направлением создание и развитие систем специализированных интерфейсов в задачах научной визуализации, ориентированных на обработку и визуальное представление численных данных в режиме автоматического сценария. Прототип подобной системы описан в [39]. Использование таких систем позволит отлаживать наиболее нужный исследователю вид, метод, алгоритм визуального представления для объекта или явления в классе задач, создавать сценарий визуального представления и автоматически переносить этот сценарий на другой объект из этого класса задач.

Интересным и перспективным направлением является подход, предложенный в [40], к построению визуальных представлений, оптимальных с точки зрения человеческого восприятия (Model-based Visualization). Данный подход основан на параметризации и формализации задачи визуального представления. Для модели визуального представления выбираются группа управляющих параметров модели и группа параметров, определяющих оптимальное восприятие. Для управляющих параметров модели визуализации вариационная задача решается до тех пор, пока параметры, определяющие оптимальное восприятие, не достигнут нужных значений.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появление современных сверхпроизводительных систем параллельных вычислений позволяет решать все более сложные задачи математического моделирования. Результатом этого являются огромные объемы числовых данных, которые нуждаются в обработке, анализе, изучении, трактовке. Для этих целей необходимы соответствующие инструменты. Их отсутствие ставит под сомнение смысл применения сверхпроизводительных вычислительных систем в задачах математического моделирования. Именно такими инструментами являются концепции, методы, алгоритмы и программные средства научной визуализации.

Научная визуализация становится катализатором интенсивной разработки новых открытий и технических решений в различных областях современной науки и техники. Системы научной визуализации помогут не только достойно представлять результаты вычислений, но также объединять и анализировать результаты вычислений и экспериментов, накопленные ранее, легко и свободно оперировать огромными объемами информации. Для достижения этого на новом уровне развития научной визуализации предстоит решить ряд глобальных задач.

1. Выработка новых концепций и степени условности визуального представления физических процессов.
2. Разработка единых критериев качественной оценки визуального представления вычислительных и экспериментальных результатов.
3. Согласование алгоритмов визуального представления численных решений с законами физических процессов.

Дальнейшее развитие методов и алгоритмов визуального представления численных данных, обеспечивающее обработку и анализ результатов численных экспериментов, становится одним из важнейших современных направлений математического моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mueller T.J.* Flow visualization by direct injection // *Fluid Mech. Measurements*. Hemisphere Pubk. Co. 1983. P. 307–375.
2. <http://www.aviaport.ru/directory/dict/?id=2503&char=240&type=Term&page=10>
3. Альбом течений жидкости и газа / Под ред. М. Ван-Дайка. М.: Мир, 1986.
4. *Белозеров А.Ф.* Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань: Изд-во КГТУ, 2007.
5. *Баяковский Ю.М., Галактионов В.А., Михайлова Т.Н.* ГРАФОР. Графическое расширение Фортрана. М.: Наука, 1985.
6. Математическое обеспечение графопостроителей. II уровень. СМОГ. Инструкция по программированию / Под ред. Ю.А. Кузнецова. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1976.
7. *Woodsford P.A.* The design and implementation of the GINO 3D graphics software package. *SOFTWARE // Practice and Experience*. 1971. V. 1. № 4. P. 335–365.
8. *McCormick B., DeFanti T., Brown M.* Visualization in scientific computing // Eds. New York: ACM Press, 1987.
9. Применение методов научной визуализации в прикладных задачах // М.: МГУ, 2000.
10. Научная визуализация в прикладных задачах // М.: МГУ, 2003.
11. *Могиленских Д.В., Павлов И.В., Фёдоров В.В. и др.* Принципы построения и функциональное содержание системы визуализации для анализа скалярных и векторных полей, заданных на двумерных регулярных сетках: Препринт № 172. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2000.
12. *Могиленских Д.В., Павлов И.В., Сапожникова Е.Э.* Методы трехмерного графического представления двумерных данных результатов решения задач математической физики // Тр. междунар. конф. “V За-бабахинские научн. чтения”. Снежинск, 1998. С. 136–137.
13. *Бондарев А.Е., Бондарев Е.Н.* Функции визуализации в вычислительной аэрогазодинамике // *Общерос. научно-техн. журнал “Полет”*. М.: Машиностр. 2000. № 10. С. 53–60.
14. *Горячев В.Д.* Визуализация результатов расчетов в I&CS<sub>2</sub> – сетевой информационно-вычислительной системе моделирования термогидродинамических процессов // *Применение методов научн. визуализации в прикл. задачах*. М.: МГУ, 2000. С. 19–36.
15. *Гудзовский А.В., Клименко С.В.* Визуализация свободно-конвективных течений жидкости в полости // Тр. междунар. конф. по компьютерной графике ГРАФИКОН-1998. М.: МГУ, 1998. С. 31–38.
16. *Stolk J., van Wijk J.J.* Surface-particles for 3D flow visualization // *Advances in Scient. Visualization*. Berlin: Springer, 1992. P. 119–130.
17. *Сельвачев А.Ю., Аксенов А.А., Клименко С.В.* Анимационная визуализация трехмерных векторных полей // Тр. междунар. конф. по компьютерной графике ГРАФИКОН-1998. М.: МГУ, 1998. С. 53–56.
18. *Forsell L.K., Cohen S.D.* Using line integral convolution for flow visualization: Curvilinear grids, variable-speed animation and unsteady flows // *IEEE Trans. Visualization and Comput. Graphics*. 1995. V. 1. 2). P. 133–141.
19. *Interrante V., Grosch C.* Visualizing 3D flow // *IEEE Comput. Graphics and Applications*. 1998. V. 18. № 4. P. 70–74.
20. *Anikanov A.A., Potiy O.A.* Texture advection for 3D flow visualization // 13th Internat. Conf. Comput. Graphics: GraphiCon’2003, M., 2003. P. 100–105.
21. *Mogilenskikh D.V.* Nonlinear color interpretation of physical processes // Proc. 10th Internat. Conf. Comput. Graphics & Vision GRAPHICON’2000. M., 2000. P. 202–211.
22. *Базаров С.Б.* Применение цифровой обработки изображений для визуализации результатов газодинамических расчетов // *Применение методов научной визуализации в прикл. задачах*. М.: МГУ, 2000. С. 39–42.
23. *Афендииков А.Л., Левкович-Маслюк Л.И., Луцкий А.Е., Плёнкин А.В.* Локализация разрывов в полях газодинамических функций с помощью вейвлет анализа // *Матем. моделирование*. 2008. Т. 20. № 7. С. 65–84.
24. *Kenwright D., Haines R.* Automatic vortex core detection // *IEEE Comput. Graphics and Applic.* 1998. V. 18. № 4. P. 70–74.
25. *Бондарев А.Е., Бондарев Е.Н.* О трассировке вихревых структур // *Научн. визуализация в прикл. задачах*. М.: МГУ, 2003. С. 4–13.
26. *Tricoche X., Garth C.* Topological methods for visualizing vortical flows // *Math. Foundations Scient. Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration*. Berlin: Springer, 2009. P. 89–108.
27. *Алексеев А.К., Бондарев А.Е.* Визуализация переноса погрешности при расчете поля течения // *Научн. визуализация в прикл. задачах*. М.: МГУ, 2003. С. 4–13.
28. *Бондарев А.Е.* Применение методов визуализации для оптимизации гибридных разностных схем с учетом влияния вязкости и турбулентности // Тр. I междунар. конф. “Трехмерная визуализация научной, техн. и социальной реальности. Кластерные технологии моделирования”. Ижевск: УдГУ, 2009. Т. 1. С. 120–123.
29. *Uselton S.* ExVis: developing A wind tunnel data visualization tool // Proc. IEEE Visualization 97. New York: ACM Press, 1997. Oct. P. 417–420.

30. CFD software COMGA – COvection in microgravity and applications: <http://www.comga.ru>
31. *Нестеров И.А.* Интерактивная визуализация векторных полей на распределенных вычислительных системах // Матем. моделирование. 2008. Т. 20. № 6. С. 3–14.
32. *Iakovovski M., Nesterov I., Krinov P.* Large distributed datasets visualization software, progress and opportunities // Comput. Graphics & Geometry. 2007. V. 9. № 2. P. 1–19.
33. *Cruz-Neira C., Sandin D., DeFanti T.* Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE // SIGGRAPH'93: Proc. 20th Ann. Conf. on Comput. Graphics and Interactive Techn. 1993. P. 135–142.
34. *Андреев С.В., Галактионов В.А., Денисов Е.Ю., Кирилов Н.Е.* Синтез фотореалистичных трехмерных изображений в современных системах презентаций // Программные продукты и системы. 2007. № 3. С. 37–40.
35. *Ванданов В.Г., Долговесов Б.С., Исламов Р.Р. и др.* Программно-аппаратный комплекс 3D презентаций на основе виртуальной студии и виртуального окружения // Тр. I междунар. конф. “Трехмерная визуализация научн., техн. и социальной реальности. Кластерные технологии моделирования” / Ижевск: УдГУ, 2009. Т. 1. С. 73–77.
36. NIH/NSF Visualization research challenges report // IEEE Comput. Soc., 2006.
37. *Preusser T., Rumpf M., Telea A.* Flow visualization via partial differential equations // Math. Foundations of Scient. visualization, comput. Graphics, and Massive Data Exploration. Berlin: Springer, 2009. P. 157–190.
38. *Doleisch H., Mayer M., Gasser M. et al.* Case study: Visual analysis of complex, time-dependent simulation results of a diesel exhaust system // Proc. VI Joint IEEE TCVG-EUROGRAPHICS Symposium on Visualization. 2004. P. 91–96.
39. *Ma Kwan-Liu.* Visualizing visualizations // IEEE Comput. Graphics and Applic. 2000. V. 20. № 5. P. 16–19.
40. *van Wijk J.J.* Model-based visualization: Computing perceptually optimal visualizations // Math. Foundations of Scient. Visualization, Comput. Graphics, and Massive Data Exploration. Berlin: Springer, 2009. P. 343–350.
41. *Belotserkovskii O.M., Chechetkin V.M., Oparin A.M.* Visualization of Hydrodynamic Calculations // Научн. визуализация в прикл. задачах. М.: МГУ, 2003. С. 13–20.
42. *Бобков В.А., Мельман С.В.* Система визуализации пространственных полей синоптических объектов // Тр. междунар. конф. по компьютерной графике ГРАФИКОН-2006. М.: МГУ, 2007. С. 264–268.