

Научная визуализация в задачах вычислительной физики: концепции, методы, перспективы

А.Е. Бондарев, В.А.Галактионов

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

bond@keldysh.ru; vlgal@gin.keldysh.ru

1. Введение

Данная работа представляет 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.

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 измерить количественные характеристики явления, но и увидеть их, сделав физические процессы видимыми. Можно вспомнить камеру Вильсона, подкрашивание

ламинарных потоков в каналах, наклеивание длинных шелковых нитей на модели и макеты, размещаемые в аэродинамических трубах, инъекция в газовые потоки струек дыма и гелиевых пузырей [1].

Существует аналогия между численным и физическим экспериментом. В физическом эксперименте часто 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. 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.

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. Физическая визуализация в экспериментах была основным источником информации до появления математического моделирования. С появлением и развитием численного эксперимента, физический эксперимент остался основным средством контроля и верификации численных исследований. Продолжают развиваться разнообразные экспериментальные методы визуализации прозрачных сред [2]. 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 вспомогательного инструмента научная визуализация становится во многих случаях 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 породило развитие программных средств визуального представления численных данных. Именно в это время появляются такие пакеты графических программ как Графор [3], СМОГ [4], GINO 3D [5], Plot10. Начинается развитие программного обеспечения, позволяющего представлять результаты научной и конструкторской работы визуально.

На этом этапе в вычислительной механике жидкости и газа решались 3D стационарные задачи и 2D 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 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН под руководством Ю.М. Баяковского. Представленный в виде библиотек программный комплекс позволял квалифицированному пользователю не только иметь первичный инструментарий 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 времени 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, 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 [6]. Эти события положили начало развитию научной визуализации.

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

С целью определить новые пути развития визуализации в рамках международной конференции по компьютерной графике ГРАФИКОН были организованы круглые столы по применению научной визуализации в прикладных задачах [7, 8]. Одним из важнейших результатов данных форумов было обсуждение выработки общих критериев визуального представления. Было отмечено, что необходимым признаком научной визуализации является наличие визуальной концепции. Было введено важное понятие – информационной ценности визуального образа.

3. Развитие концепций визуального представления данных

Параллельно развитию вычислительных средств и математических методов происходило развитие концепций визуального представления численных данных.

В период, когда в вычислительной математике и прикладных областях рассматривались в основном двумерные задачи, концепция визуального представления численных решений этих задач была 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 данных были успешно сформулированы в работе [9]. Также в этой работе было перечислено необходимое функциональное содержание подобной системы визуализации.

При усложнении алгоритмов и задач даже для двумерных данных рамки вышеописанной 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 расчетных данных. Предлагались различные способы квазитрехмерного визуального представления двумерных данных [10] с целью расширения рамок двумерной концепции. Для задач с 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 так далее [10].

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 стали по большей части трехмерными и нестационарными, в научной визуализации произошла естественная попытка автоматически перенести концепцию и методы визуального представления двумерных данных на трехмерный случай. Естественно, визуальное представление трехмерных нестационарных процессов имело свою специфику и сразу выявило ряд проблем.

В работе [11] описаны традиционные методы визуального представления численных решений трехмерных нестационарных задач для вычислительной аэрогазодинамики. Трехмерность моделируемого нестационарного процесса создает существенные трудности для визуального представления результатов, особенно там, где вычислитель не обладает априорной информацией о характере течения. Для представления решения трехмерной задачи необходимо использование комбинированных алгоритмов и подходов графического представления, 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, в которых концентрировались все существующие средства визуального представления и все возможные комбинации этих средств.

Примером реализации такого подхода можно рассматривать систему для моделирования 2D и 3D нестационарных задач гидродинамики [12]. В среде этой системы 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 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. 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, появлявшиеся по мере дальнейшего развития вычислительной техники и вычислительных методов. Зачастую стремление реализовать все имеющиеся средства визуального представления, приводило к информационной перегруженности образов. Это понижало информационную ценность визуальных образов, несмотря на выдающуюся выразительность и привлекательность.

Новые задачи и численные методы, 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. Во многих случаях эти задачи ставятся в оптимизационном виде. Стандартные системы визуального представлению 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 для обеспечения реальных потребностей современных 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:

- методы, основанные на повышении выразительности визуального образа. В дальнейшем изложении будем их называть – «Методы выразительности»;

- методы, основанные на анализе данных. В дальнейшем изложении будем их называть – «Методы анализа данных».

В отдельную группу необходимо выделить подходы, связанные с произошедшим за последнее десятилетие интенсивным развитием вычислительной техники. Это явление открывает новые возможности визуального представления данных, но порождает новые проблемы. Упомянутые подходы основаны на организации возможности применения ранее разработанных методов, алгоритмов, программных средств на новой вычислительной технике. Как правило, эта группа подходов не содержит в себе новых концепций и методов визуального представления, но стремится приспособить известные методы к новой технике.

Методы выразительности

Описываемая группа методов имеет одно общее свойство – они посвящены решению проблем визуальных представлений с помощью усиления выразительности результирующего образа. Эффективный прием повышения выразительности образа предложен в [13], где рассматриваются проблемы визуализации течений жидкости с изменчивой пространственно-временной структурой в объеме. 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. Отмечается, что для визуализации 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 [14] (МЧА-методы), основанных на визуальном представлении движения множества маркеров в объектном пространстве. В работе [15] предложен следующий единый подход к реализации МЧА-методов визуального представления векторных полей. 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 вышеописанного 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 [16]. Выразительный и многофункциональный LIC - метод успешно применяется для рисования линий и трубок тока в трехмерной области, помогая представить трехмерную глубину и ориентацию взаимоналагающихся линий тока. 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 [17].

Несмотря на внешнюю выразительность образов и на видимые преимущества в исследованиях тонких топологий численных решений, методы выразительности до совсем недавнего времени не находили применения в современных коммерческих программных пакетах визуализации. Скорее всего, дело 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.

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. 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; дополнительные анализ и обработка этого поля; 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.

Эффективный метод, основанный на анализе данных, был предложен в работе [18]. 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.

Другой способ выделения структур в решении, основанный на применении алгоритмов обработки изображений к полю данных, полученных в процессе решения задач математической физики, предложен в работе [19]. 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. Изложенный подход не зависит от конкретного вида решаемой задачи и не требует никакой априорной информации о течении. Он ускоряет обработку результатов и повышает объективность интерпретации получаемых результатов.

Это направление получило дальнейшее развитие с применением мощного современного математического аппарата вейвлет-анализа. Работа [20] посвящена выделению и классификации сингулярностей газодинамических полей – ударных волн, слабых и контактных разрывов. Алгоритм [20] основан на разложении исходных газодинамических полей по вейвлетным базисам с последующим анализом полученных коэффициентов.

Одним из важных направлений исследования пространственно-временных структур является анализ зон циркуляционного течения. В нестационарных задачах нужно проследивать не только наличие циркуляционной зоны, но и отслеживать во времени процесс зарождения, развития и распада вихря. В работе [21] предложен подход

обнаружения и прослеживания центра вихря в расчетной области, основанный на анализе собственных значений якобиана матрицы компонент скорости. В [22] этот метод был обобщен на случай вязких течений и применен к исследованию циркуляционных зон в задаче о взаимодействии вязкого потока со спутной струей. Трассировка центров вихрей в процессе моделирования позволяет следить за эволюционной картиной течения. Данное направление развивает работа [23], исследующая процессы анализа и визуализации вихревых течений с помощью топологических методов, что позволяет прослеживать критические точки течения, контролировать процессы зарождения и распада вихрей в потоке.

В работе [24] предлагается проводить визуальное представление не только параметров основного поля результатов, но при решении сопряженных задач получать новую 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 используется для поиска зон наиболее эффективного контроля или для выбора зон измерения. Поле сопряженных параметров позволяет рассчитать и визуализировать вклады ошибки исходных данных и погрешности дискретизации в погрешность целевого функционала, что используется для получения решения с необходимой точностью.

Метод [25] рассматривает проблемы визуального представления определяющих параметров задач оптимизации. В практических целях подобные задачи формулируются так: найти при каких определяющих параметрах в классе задач возникает интересующее 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 для построения визуальной концепции решения обратных задач. Организация многократного расчета обратной задачи соответствует идеологии многопроцессорных параллельных расчетов. Данный методологический подход был успешно применен для оптимизации вычислительных свойств гибридных разностных схем (в качестве события рассматривалось возникновение нежелательных осцилляций) [25].

Важным направлением является развитие систем визуализации экспериментальных данных, которые помогают накапливать, верифицировать, и сравнивать данные. Прототип подобной системы ExVis (Exploratory Visualization) был описан в работе [26], где приведены основные принципы построения и функционального наполнения подобной системы.

Подходы, обеспечивающие соответствие современной вычислительной технике

В отдельную группу нужно выделить подходы к визуальному представлению данных, основанные на использовании новых возможностей вычислительной техники. Примером такого подхода можно назвать [27], где содержатся принципы и пример организации компьютерной виртуальной лаборатории на базе возможностей персональных компьютеров. Компьютерная лаборатория COMGA [27] 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 актуальным направлением являются работы по организации визуального представления с помощью параллельных вычислительных систем. В качестве примеров разработок в этой области можно привести [28, 29]. 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. Эти проблемы разрешаются путем организации оптимального потока данных между пользователем и суперкомпьютером [28].

Отдельным важным направлением является создание систем виртуального окружения. Подобные системы дают возможность исследовать сложные физические процессы. Первая система такого рода CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) была разработана в 1992 г. и представлена на конференции ACM SIGGRAPH'93 [30]. Это направление активно развивается. Примером успешной реализации систем виртуального окружения можно назвать работу [31], описывающую визуальное представление 3D объектов с физически аккуратной картиной глобальной освещенности с учетом изменения объектов в режиме реального времени. Число подобных систем, ориентированных на разные классы задач, постоянно растет.

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. Это обстоятельство будет определять основные направления развития и будущие задачи научной визуализации. Многие направления отмечены в совместном докладе Национального научного фонда США (NSF) и Национального института здоровья (NIH) о будущем научной визуализации [32].

Одним из необходимых условий развития научной визуализации станет адаптация существующих концепций, методов и подходов визуального представления к применению

на параллельных вычислительных системах. Здесь основная задача – сохранение наработанного опыта и перенос его на высокопроизводительные вычислительные системы.

Основным направлением развития концепций и методов визуализации становится дальнейшая разработка методов анализа данных, их расширение на другие прикладные области и синтез с методами выразительности [33].

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.

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 таких систем, обеспечивающих контроль расчетного процесса должна сыграть важную роль в научных исследованиях.

В связи с этим становится очень актуальным направлением развитие систем специализированных интерфейсов в задачах научной визуализации, ориентированных на обработку и визуальное представление данных в режиме автоматического сценария [34]. Использование таких систем позволит отлаживать наиболее нужный исследователю вид, метод, алгоритм визуального представления, создавать сценарий визуального представления и автоматически переносить этот сценарий на другие схожие объекты.

Интересным и перспективным направлением является подход [35] 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 решается вариационная задача, до тех пор, пока параметры, определяющие оптимальное восприятие, не достигнут нужных значений.

6. Заключение

Научная визуализация становится катализатором интенсивной разработки новых открытий и технических решений в различных областях современной науки и техники. Системы научной визуализации помогают не только достойно представить результаты вычислений, но также объединять и анализировать результаты вычислений и экспериментов, накопленные ранее. Для достижения этого на новом уровне развития научной визуализации предстоит решить такие глобальные задачи, как:

- выработка новых концепций и степени условности визуального представления физических процессов;
- разработка единых критериев качественной оценки визуального представления вычислительных и экспериментальных результатов;
- согласование алгоритмов визуального представления численных решений с законами физических процессов.

Литература

[1] Mueller T.J. Flow Visualization by Direct Injection // Fluid Mechanics Measurements, Edited by Goldstein R.J, Hemisphere Pub. Co., 1983, pp.307-375.

[2] Белозеров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань, Изд.КГТУ, 2007, 747 с.

[3] Баяковский Ю.М., Галактионов В.А., Михайлова Т.Н. «ГРАФОР. Графическое расширение Фортрана» М., Наука, 1985.

[4] Математическое обеспечение графопостроителей. II уровень. СМОГ. Инструкция по программированию / Под ред. Ю.А.Кузнецова, Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1976. 78 с.

[5] Woodsford P.A. The design and implementation of the GINO 3D graphics software package. – SOFTWARE: Practice and Experience, 1971, v.1, No 4, pp.335-365.

[6] McCormick B., DeFanti T., Brown M. (eds.). Visualization in Scientific Computing. ACM Press, 1987.

[7] «Применение методов научной визуализации в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2000, 58 с.

[8] «Научная визуализация в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2003, 48 с.

[9] Могиленских Д.В., Павлов И.В., Федоров В.В., Мельникова С.Н., Сапожникова Е.Э. Принципы построения и функциональное содержание системы визуализации для анализа скалярных и векторных полей, заданных на двумерных регулярных сетках / Препринт РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск, № 172, 2000, 26 стр.

[10] Могиленских Д.В., Павлов И.В., Сапожникова Е.Э. Методы трехмерного графического представления двумерных данных результатов решения задач математической физики / Труды международной конференции «V Забабахинские научные чтения», Снежинск, 1998, с.136-137.

[11] Бондарев А.Е., Бондарев Е.Н. Функции визуализации в вычислительной аэрогазодинамике // Общероссийский научно-технический журнал «Полет», Москва, «Машиностроение», № 10, 2000, с.53-60.

[12] Горячев В.Д. Визуализация результатов расчетов в I&CS₂ – сетевой информационно-вычислительной системе моделирования термогидродинамических процессов // «Применение методов научной визуализации в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2000, с.19-36.

[13] Гудзовский А.В., Клименко С.В. Визуализация свободно-конвективных течений жидкости в полости // Труды международной конференции по компьютерной графике ГРАФИКОН-1998, Москва, МГУ, 1998, с.31-38.

[14] Stolk J., van Wijk J.J. Surface-Particles for 3D Flow Visualization // *Advances in Scientific Visualization*, Springer Verlag, 1992, pp.119-130.

[15] Сельвачев А.Ю., Аксенов А.А., Клименко С.В. Анимационная визуализация трехмерных векторных полей // Труды международной конференции по компьютерной графике ГРАФИКОН-1998, Москва, МГУ, 1998, с.53-56.

[16] Forsell L.K., Cohen S.D. Using Line Integral Convolution for Flow Visualization: Curvilinear Grids, Variable-Speed Animation and Unsteady Flows // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1995, 1(2), pp.133-141.

[17] Anikanov A.A., Potiy O.A. Texture Advection for 3D Flow Visualization // *The 13th International Conference on Computer Graphics: GraphiCon'2003*, Moscow, 2003, p.100-105.

[18] Mogilenskikh D.V. Nonlinear Color Interpretation of Physical Processes // *Proc. 10th International Conference on Computer Graphics & Vision GRAPHICON'2000*, Moscow, 2000, p.202-211.

[19] Базаров С.Б. Применение цифровой обработки изображений для визуализации результатов газодинамических расчетов // «Применение методов научной визуализации в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2000, с.39-42.

[20] Афендииков А.Л., Левкович-Маслюк Л.И., Луцкий А.Е., Плёнкин А.В. Локализация разрывов в полях газодинамических функций с помощью вейвлет анализа // *Математическое моделирование*, 2008, т. 20, №7, с. 65-84.

[21] D.Kenwright, R. Haimes «Automatic Vortex Core Detection», *IEEE Computer Graphics and Applications*, v.18, N 4, 1998, p.70 - 74.

[22] Бондарев А.Е., Бондарев Е.Н. О трассировке вихревых структур // «Научная визуализация в прикладных задачах», Сб. науч.тр., Москва, МГУ, 2003, с.4-13.

[23] Tricoche X., Garth C. Topological Methods for Visualizing Vortical Flows // *Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration*, Ed. by Möller T., Hamann B., Russell R., Springer-Verlag, 2009, pp.89-108.

[24] Алексеев А.К., Бондарев А.Е. Визуализация переноса погрешности при расчете поля течения // «Научная визуализация в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2003, с.4-13.

[25] Бондарев А.Е. Применение методов визуализации для оптимизации гибридных разностных схем с учетом влияния вязкости и турбулентности // Тр.1-й межд. конференции «Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности»/ УдГУ – Ижевск, 2009. – т.1, с. 120-123.

[26] Uelton S. «ExVis: Developing A Wind Tunnel Data Visualization Tool» Proc. IEEE Visualization 97, ACM press, New York, Oct.1997, pp.417-420.

[27] CFD Software COMGA - CONvection in MicroGravity and Applications: <http://www.comga.ru>

[28] Нестеров И.А. Интерактивная визуализация векторных полей на распределенных вычислительных системах // Математическое моделирование, 2008, т.20, № 6, с. 3-14.

[29] M. Jakobovski, I. Nesterov, P. Krinov. Large distributed datasets visualization software, progress and opportunities // Computer Graphics & Geometry, 2007, Vol. 9, N 2, pp. 1-19.

[30] Cruz-Neira C., Sandin D., DeFanti T. "Surround-Screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE" // SIGGRAPH'93: Proc. of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1993, pp. 135-142.

[31] Андреев С.В., Галактионов В.А., Денисов Е.Ю., Кирилов Н.Е.. Синтез фотореалистичных трехмерных изображений в современных системах презентаций // "Программные продукты и системы", № 3, 2007, с.37-40.

[32] NIH/NSF Visualization Research Challenges Report, IEEE Computer Society, 2006.

[33] Preusser T., Rumpf M., Telea A. Flow Visualization via Partial Differential Equations // Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration, Ed. by Möller T., Hamann B., Russell R., Springer-Verlag, 2009, pp.157-190.

[34] Ma Kwan-Liu «Visualizing Visualizations» IEEE Computer Graphics and Applications, v.20, N 5, 2000, p.16 - 19.

[35] van Wijk J.J. Model-Based Visualization: Computing Perceptually Optimal Visualizations// Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration, Ed. by Möller T., Hamann B., Russell R., Springer-Verlag, 2009, pp.343-350.