

# Анализ развития концепций и методов визуального представления данных в научных исследованиях задач вычислительной физики

А.Е.Бондарев, В.М.Чечеткин  
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН  
Москва, Россия  
[bond@keldysh.ru](mailto:bond@keldysh.ru); [chech@gin.keldysh.ru](mailto:chech@gin.keldysh.ru)

## Аннотация

В данной работе рассматриваются основные стадии развития научной визуализации как самостоятельной 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.

**Ключевые слова:** научная визуализация, концепция визуального представления, методы визуализации.

## 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 всех без исключения 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 к этому моменту. Данное развитие соответствовало уровню сложности решаемых задач, уровню развития вычислительной техники, уровню развития математических методов.

Одновременно развивались концепции визуального представления численных данных, соответствующая когнитивному уровню и потребностям науки и техники в соответствующий период. Данная работа рассматривает процесс исторического развития научной визуализации как отдельной дисциплины и развития концепций визуального представления численных данных. Также рассматриваются современные потребности и перспективы развития методов визуального представления.

## 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КАК ОТДЕЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Термин **Научная Визуализация (Scientific visualization)** 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.

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 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 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 [1].

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 [2]. Согласно [2] «...Известные достоинства оптических методов - высокая чувствительность, бесконтактность применения, отсутствие влияния на параметры исследуемого явления, возможность проведения качественных и количественных измерений - способствовали использованию их при визуализации и изучении неоднородностей в прозрачных средах... Задача визуализации неоднородностей в прозрачных средах состоит в том, чтобы изменения фазы проходящего через них волнового фронта преобразовать в изменения освещенности изображения исследуемого объекта, которые легко регистрируются ...»

С появлением компьютеров возникла возможность проводить численные 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.

Это превращение происходило следующим образом. Соответствующие времени технические требования к расчетам вызывали необходимость развития вычислительных методов для решения все более сложных задач. Параллельно с этим развивались методы визуализации численных решений в этой области знания.

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 графических программ как Графор[3], СМОГ [4], Графал, Plot10.

Здесь 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 неограниченную 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 этот 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, равно необходимой во всех остальных областях знания.

Именно этот момент и следует рассматривать как точку становления научной визуализации как самостоятельной научной дисциплины. Об этом рассказывал на проводившемся в 2000 году в рамках 10-й Международной конференции ГРАФИКОН-2000 круглом столе «Применение методов научной визуализации в прикладных задачах» С.В.Клименко (Институт физики высоких энергий, Протвино):

«...все начиналось с проблемы визуального представления научных данных и результатов расчетов. Эта проблема была сформулирована на дискуссии в 1987 году, которая состоялась в феврале. 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...» [5].

В 1987 г. национальным научным фондом США была создана Инициатива ViSC (Visualization in Scientific Computing), нацеленная на создание систем визуализации. Эти события положили начало развитию отдельной научной дисциплины – научной визуализации, обладающей своими научными форумами, своими органами научной печати, своими профессиональными научными сообществами.

На современном этапе развития параллельно с развитием средств вычислительной 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 обычно 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 зависело от возможностей вычислительных ресурсов, в первую очередь, а во вторую – от уровня решаемых задач математического моделирования и используемых при этом численных методов.

В попытках найти новые пути развития в 2000, 2003 годах в рамках Международной конференции ГРАФИКОН были организованы круглые столы по проблеме развития и применения научной визуализации в прикладных задачах. Инициатором этих форумов являлся Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, организаторами и модераторами выступали А.Е. Бондарев, Ю.М.Баяковский, В.А.Галактионов, С.В. Клименко. Эти мероприятия собрали специалистов их разных стран из разных областей науки и техники: от ядерной физики до биологии, медицины и фармацевтического производства. По ходу обсуждений 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 физическую 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, параллельно усложнению задач науки и инженерии произошло 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 примерно сформулировать так: «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, имеющими масштаб и направление, 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 данной концепции являлось то, что коллективы ученых, конструкторов, инженеров и коллективы разработчиков графических средств визуального представления численных данных существовали в рамках вышеизложенной концепции абсолютно раздельно. Это существенно мешало развитию.

Основные принципы построения системы визуализации для анализа двумерных скалярных и векторных полей были успешно сформулированы в работе [6]. 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 полученных расчетных данных. Предлагались различные способы квазитрехмерного визуального представления двумерных данных. 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.

Предлагалось, например, последовательно расположить перпендикулярно оси времени набор двумерных сечений, взятых в разные моменты времени, и, соединив изолинии соседних сечений по времени, получить некую квазитрехмерную картину.

Также предлагался 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 изобразим распределение величины  $D$ , вспыхивающими маркерами представим  $E$ , и так далее.

Основная проблема состояла в том, что практическая реализация подобных подходов продуцировала либо абсолютно нефизичную, искусственную картину, либо образ, перегруженный избыточной нескомпанованной 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 работе [7] 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 вычислительной физики во многом напоминают задачи «черного ящика», когда без применения алгоритмов визуального представления и контроля получаемых в процессе расчета результатов даже для опытного расчетчика трудно полноценно представить, что же в счетной области происходит. Таким образом, для представления решения трехмерной задачи необходимо использование комбинированных алгоритмов и подходов графического представления, иначе обеспечить понимание качественной картины течения сложно.

В качестве попытки преодолеть ограничения, накладываемые автоматическим переносом двумерной концепции визуального представления на трехмерный случай, как направление развивалось создание ориентированных на конкретный класс задач вычислительных комплексов. Эти комплексы обладали модулями научной визуализации, предназначенными 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.

Успешным примером реализации такого подхода можно рассматривать информационно-вычислительную систему, описанную в [8], предназначенную для моделирования двумерных и трехмерных нестационарных задач вычислительной гидродинамики. 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 карт, 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. 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.

Появившиеся 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. Суть этой проблемы выражена в выступлении А.К.Алексеева (РКК «Энергия», г.Королев) [9]:

«...за бортом остается вопрос: что же именно нужно представлять визуально, что наиболее необходимо для практики?»

Когда к нам приходят специалисты 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... 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 смещение) и т.д. В задачах идентификации, по измерениям в поле выбираются коэффициенты, источники 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 еще и сопряженные параметры...»

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 ЧИСЛЕННЫХ ДАННЫХ**

Основной задачей последнего десятилетия в развитии средств научной визуализации было преодоление зоны взаимонепонимания между разработчиками программных средств визуализации и потребителями их продуктов – исследователями и инженерами. Это взаимное непонимание имело свои корни в концепции, трактовавшей научную визуализацию как простое графическое отображение неких скалярных и векторных полей

Подобная трактовка блокировала дальнейшее развитие, как самой научной визуализации, так и всех научных дисциплин и областей, где применение методов визуального представления могло бы привести к принципиально новым результатам.

Преодоление рамок вышеизложенных представлений – старой концепции – 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 численных данных, но порождает новые проблемы. Упомянутые подходы основаны на организации возможности применения уже разработанных ранее методов, алгоритмов, программных средств на новой вычислительной технике, реализации сочетания имеющихся методов с новыми вычислительными возможностями. Следует отметить, что эта группа подходов, как правило, 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 конкретных проблем, возникающих при определенных визуальных представлениях, с помощью усиления и повышения выразительности результирующего образа. Простой и убедительный прием повышения выразительности образа предложен в работе [10]. В данной работе 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. «...При анализе течения в полости возникает проблема визуализации течения *как такового*, т.е.

течения жидкости в которой ничего нет кроме ее самой. Основная трудность визуализации течения как такового связана с отсутствием у человека априорных образов движущейся в объеме жидкости... Мы видим движение жидкости только через движение каких-либо поверхностей, которые мы связываем с жидкостью... В рассматриваемом течении... характерной поверхностью, восприятие движения которой позволяет получить представление о движении жидкости в объеме, может служить изоповерхность нейтральной температуры. Для четкого выделения в кадре границы раздела областей, занятых холодной и теплой жидкостями, связь между интенсивностью цвета и температуры выбирается нелинейной. Использование нелинейной зависимости приводит к нарочитому заострению границы между областями, занятыми теплой и холодной жидкостями. Тем самым формируется искусственное представление о наличии в объеме двух жидкостей с резкой границей раздела...» [10].

Важным направлением среди методов визуального представления векторных полей является группа многочастичных анимационных методов [11] (далее МЧА-методы). Они основываются на визуальном представлении движения множества маркеров в объектном пространстве. В работе [12] предложены 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 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 [13]. 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. 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 [14].

Необходимо подчеркнуть тот факт, что, несмотря на внешнюю выразительность образов и на видимые преимущества в исследованиях тонких топологий численных решений, методы выразительности не нашли широкого 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 информационную ценность 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. Как правило, такой подход позволяет применение известного и разработанного в других областях знания мощного математического аппарата. Суть новой концепции визуального представления можно сформулировать так: **получение основного поля данных для визуального представления; дополнительные 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 в настоящее время.

Простой, красивый и эффективный метод, основанный на анализе данных, был предложен в работе [15]. 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 [16]. 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 применим к результатам расчетов, полученных любым методом сквозного счета, ускоряет обработку результатов численного моделирования, а также повышает объективность интерпретации получаемых результатов.

Это направление получило новое дальнейшее современное развитие с применением мощного современного

математического аппарата вейвлет-анализа. Работа [17] посвящена выделению и классификации сингулярностей газодинамических полей – ударных волн, слабых и контактных. Алгоритм [17] 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 работе [18] 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 работе [19] этот метод 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.

Подход, представленный в работе [20], предлагает проводить визуальное представление не только параметров основного поля результатов расчетов, но 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 [21]. 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 интересующее практического исследователя 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 работе [21] 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 был описан в работе [22], где приведены основные принципы построения и функционального наполнения подобной системы, способной оперировать с большими объемами экспериментальных и вычислительных данных.

#### **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 [23], где содержатся принципы и пример организации компьютерной виртуальной лаборатории на базе возможностей персональных компьютеров. Компьютерная лаборатория COMGA [23] 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 типичных разработок в этой области можно привести [24, 25]. 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. Системы, описанные в вышеупомянутых работах, призваны разрешить эти проблемы путем организации оптимального потока данных между пользователем и суперкомпьютером.

### **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. 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.**

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 подобных систем в разных областях знания и в разных классах задач 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

В связи с этим становится очень важным и актуальным направлением **создание и развитие систем специализированных интерфейсов в задачах научной визуализации, позволяющих обработку и визуальное представление численных данных в режиме автоматического сценария.** Прототип подобной системы описан в работе [26]. 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.

### **6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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 представить 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 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.

## 7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Альбом течений жидкости и газа. Под ред. М. Ван-Дайка. М., Мир, 1986, 182 с.
- [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] Стенограмма выступления С.В. Клименко (Институт физики высоких энергий, Протвино) // «Применение методов научной визуализации в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2000, с. 4
- [6] 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, N 172, 2000, 26 стр.
- [7] Бондарев А.Е., Бондарев Е.Н. Функции визуализации в вычислительной аэрогазодинамике // Общероссийский научно-технический журнал «Полет», Москва, «Машиностроение», N 10, 2000, с.53-60
- [8] Горячев В.Д. Визуализация результатов расчетов в I&CS<sub>2</sub> – сетевой информационно-вычислительной системе моделирования термогидродинамических процессов // «Применение методов научной визуализации в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2000, с.39-42.
- [9] Стенограмма выступления А.К. Алексеева (РКК «Энергия», Королев) // «Применение методов научной визуализации в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2000, с.6-8.
- [10] 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.
- [11] Stolk J., J.J. van Wijk . Surface-Particles for 3D Flow Visualization, *Advances in Scientific Visualization*, Springer Verlag, 1992, pp.119-130.
- [12] 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.
- [13] 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 Comp. Graphics*, 1995, 1(2), pp.133-141.
- [14] Anikanov A.A., Potiy O.A. Texture Advection for 3D Flow Visualization // *The 13th International Conference on Computer Graphics: GraphiCon'2003, Moscow, Russia*. Sept. 5-10, 2003, p.100-105.
- [15] Mogilenskikh D.V. Nonlinear Color Interpretation of Physical Processes // *Proc. 10th International Conference on Computer Graphics & Vision GRAPHICON'2000, Russia, Moscow, 2000*, p.202-211.
- [16] 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.
- [17] 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, том 20, №7, страницы 65-84.
- [18] D.Kenwright, R. Haimes « Automatic Vortex Core Detection», *IEEE Computer Graphics and Applications*, v.18, N 4, 1998, p.70 - 74.
- [19] Бондарев А.Е., Бондарев Е.Н. О трассировке вихревых структур // «Научная визуализация в прикладных задачах», Сб. науч. тр., Москва, МГУ, 2003, с.4-13
- [20] 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.
- [21] Бондарев А.Е. Применение методов визуализации для оптимизации гибридных разностных схем с учетом влияния вязкости и турбулентности // Тр.1-й междунациональной конференции «Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Кластерные технологии моделирования»/ УдГУ – Ижевск, 2009. – Т.1, С. 120 – 123.
- [22] Uselton S. «ExVis: Developing A Wind Tunnel Data Visualization Tool» *Proc.IEEE Visualization 97*, ACM press, New York, Oct.1997, pp.417-420.
- [23] <http://www.comga.ru>
- [24] Нестеров И.А. Интерактивная визуализация векторных полей на распределенных вычислительных системах // *Математическое моделирование*, 2008, т.20, N 6, сс. 3-14
- [25] 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.
- [26] Ma Kwan-Liu «Visualizing Visualizations» *IEEE Computer Graphics and Applications*, v.20, N 5, 2000, p.16 - 19.

### Analyzing the Evolution of Scientific Visualization Concepts and Methods for Computational Physics

#### Abstract

This article describes the main stages of scientific visualization evolution as original field of science. The development perspectives for visual concepts, methods and approaches are considered for problems of computational physics (mainly CFD problems).

**Keywords:** *Scientific Visualization, Visual Concept, Visualization Methods*

#### Об авторах

Бондарев Александр Евгеньевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН  
E-mail: [bond@keldysh.ru](mailto:bond@keldysh.ru)

Чечеткин Валерий Михайлович – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.  
E-mail: [chech@gin.keldysh.ru](mailto:chech@gin.keldysh.ru)