

Визуализация в вычислительной аэрогазодинамике: проблемы развития

Александр Бондарев
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
Москва, Россия

Аннотация

В данной работе рассматриваются проблемы развития визуализации в вычислительной аэрогазодинамике, анализируются наиболее актуальные задачи современной аэрогазодинамики, требующие новых методов и подходов к графическому представлению вычислительных данных.

Ключевые слова: вычислительная аэрогазодинамика, визуализация данных, нестационарные течения

1. РАЗВИТИЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОГАЗОДИНАМИКЕ

«Визуализация развивается на приложениях. Без приложений визуализация ценна только с эстетической точки зрения. Приложения дают толчок для развития методов и подходов визуализации, в свою очередь эти методы позволяют обогатить результаты в приложениях» [1].

Данное высказывание как нельзя лучше характеризует процесс развития методов визуализации в вычислительной аэрогазодинамике. Соответствующие времени технические требования вызвали необходимость развития вычислительных методов, решения все более сложных задач. Параллельно с этим развивались методы визуализации численных решений в этой области знания. Этот процесс развития можно условно разделить на три этапа.

Первый этап - самый ранний, когда в вычислительной аэрогазодинамике решались в основном одномерные нестационарные и двумерные стационарные задачи. На этом раннем этапе использование методов визуализации в основном заменяли вычислителью карандаш и миллиметровую бумагу.

На следующем этапе развития решались трехмерные стационарные задачи и двумерные задачи, носящие хотя и нестационарный характер, но устанавливающиеся в процессе расчета к устойчивой картине течения. Необходимость графического представления этих решений привела к развитию инструментов визуализации. Так в России множество вычислителей успешно пользовалось комплексом

ГРАФОР [2], создавая на его базе графические программы для своих приложений.

На третьем - современном этапе развития параллельно с развитием средств вычислительной техники и техническим прогрессом в области создания летательных аппаратов значительно усложнились задачи вычислительной аэрогазодинамики. Это, как правило, двумерные и трехмерные задачи, имеющие существенно нестационарный характер, обладающие сложной геометрией. Часто подобные задачи кроме численного решения чисто аэродинамических проблем предполагают моделирование иных физических процессов, например, горения. Также при современных вычислительных средствах особое значение получают алгоритмы решения обратных задач аэрогазодинамики, имеющих своей целью обычно оптимизацию тех или иных конструктивных параметров при рассмотрении задач обтекания летательных аппаратов или оптимизацию процессов в рабочих камерах и соплах двигательных установок. Эти задачи предъявляют совершенно новые требования к графическому представлению результатов расчетов, да и в целом к роли визуализации в задачах вычислительной аэродинамики.

2. СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОГАЗОДИНАМИКИ

Таким образом можно выделить ряд признаков, характеризующий современный уровень задач вычислительной аэрогазодинамики:

- нестационарность;
- трехмерность;
- наличие сложной геометрии;
- наличие дополнительных физических процессов;
- решение обратных задач с целью оптимизации параметров.

Рассмотрим какие специфические проблемы обеспечивают некоторые из данных признаков для визуализации моделируемого в расчете физического процесса.

Изучение двумерных и трехмерных физических процессов, имеющих существенно нестационарный характер зачастую предполагает тщательное прослеживание возникновения нестационарной структуры (например, нескольких нестационарных

взаимодействующих отрывных зон) в поле газодинамического течения, ее развития, взаимодействия с другими структурами и возможного распада. При подобном изучении необходима тщательная оценка характерного времени существования нестационарной структуры, выявление зависимостей характерного времени от основных параметров задачи.

Из наиболее актуальных примеров подобных задач можно назвать следующие:

- управление отрывом потока. (Нестационарный срыв пограничного слоя с крыла во многом определяет аэродинамические характеристики современных высокоскоростных маневренных летательных аппаратов.);
- оптимизация процессов в соплах и рабочих камерах двигателей.

Многие явления в подобных задачах невозможно определить без проведения параллельно с численным расчетом процесса непрерывной визуализации, т.к. в большинстве случаев (особенно для трехмерных задач определить момент и место возникновения нестационарного вихря можно только визуально).

В качестве примера может служить задача взаимодействия сверхзвукового потока вязкого сжимаемого газа со струйной преградой. Здесь проводится численное исследование течения на внешней боковой поверхности обтекаемого сверхзвуковым вязким потоком сопла, из которого истекает спутная сверхзвуковая вязкая недорасширенная струя большой степени нерасчетности. При расширении данная струя затекает на внешнюю боковую поверхность сопла, образуя для внешнего потока струйную преграду. Наличие струйной преграды вносит возмущение во внешний поток, что приводит к отрыву пограничного слоя на внешней поверхности сопла и возникновению во внешнем потоке перед преградой области циркуляционного течения. Аналогично [3] рассматривается задача с нестационарным граничным условием на срезе сопла, где в качестве параметра струи, изменяющегося со временем выбрана степень нерасчетности недорасширенной струи $n = P_a / P_\infty = n(t)$, где P_a - давление на срезе сопла, а P_∞ - давление в набегающем потоке. В качестве математической модели используется полная система нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса для вязкого сжимаемого теплопроводного газа. Для численного решения задачи применяется неявная конечно-разностная весовая WW-схема [4].

В качестве $n = n(t)$ выбиралось три вида линейных зависимостей, характеризующих режимы изменения нерасчетности, которые можно условно назвать «медленный», «средний» и «быстрый»:

$$n = n_i(t) = 1 + A_i(t), \quad i=1,2,3, \quad n \in [1,100]$$

$$A_3 = 2A_2 = 4A_1 > 0$$

Эти зависимости использовались для моделирования различных темпов повышения степени нерасчетности струи от $n = 1$ до $n=100$.

В ходе расчетов было обнаружено, что увеличение темпа повышения нерасчетности приводит к новой качественной картине течения в окрестности циркуляционной зоны перед струйной преградой.

На рис. 1а - 3с представлены линиями тока в окрестности области взаимодействия потока со спутной струей процесс возникновения нестационарной структуры для трех различных темпов повышения нерасчетности струи.

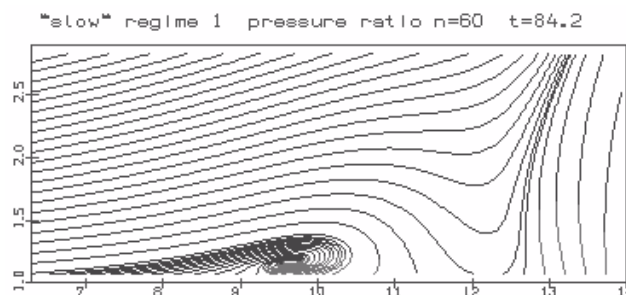


Рис.1а.

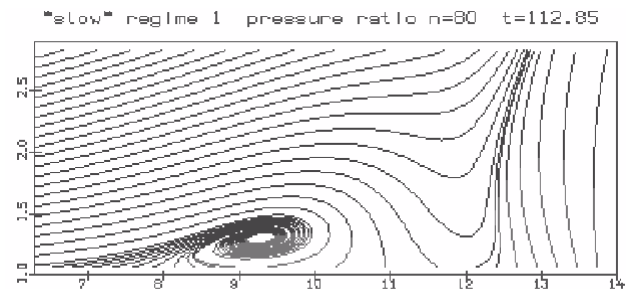


Рис.1б.

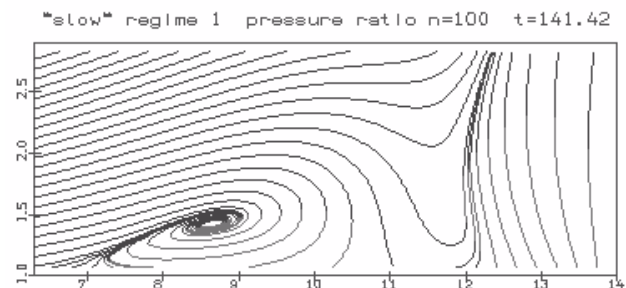


Рис. 1с.

Рис.1а, 1в, 1с представлены для различных значений «медленного» режима изменения $n(t)$. Здесь можно четко разделить поле течения на область затекания струи на внешнюю боковую поверхность сопла и циркуляционную зону. Внешний поток обгибает циркуляционную зону и затем эжектируется струей.

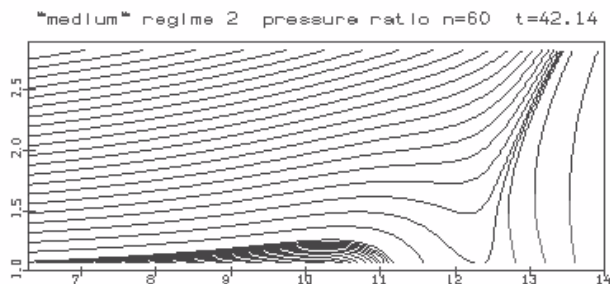


Рис.2а.

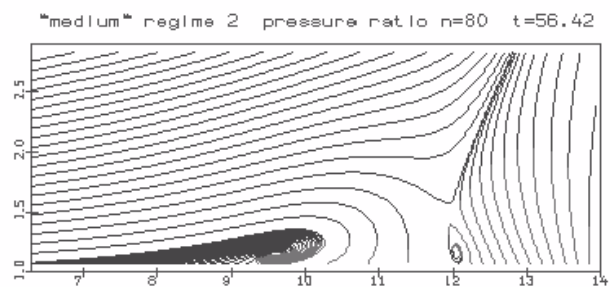


Рис.2б.

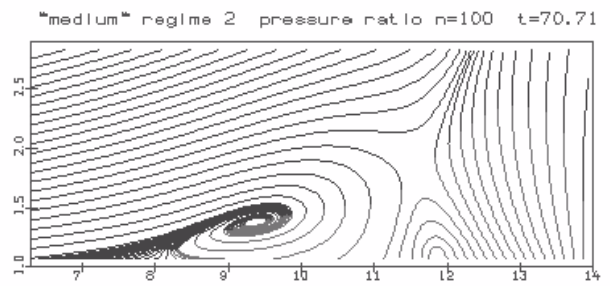


Рис.2с.

На рис. 2а,2в,2с, представляющих «средний» режим, видно образование нового вихря в области взаимодействия набегающего потока со струйной преградой. Этот режим условно можно назвать переходным.

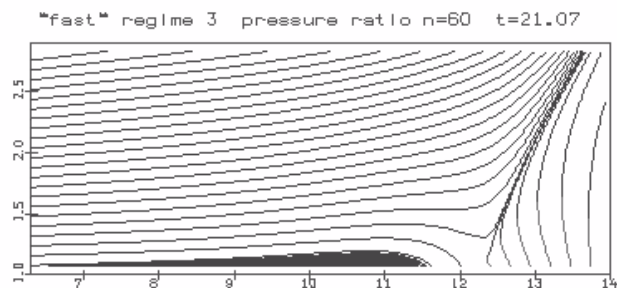


Рис.3а.

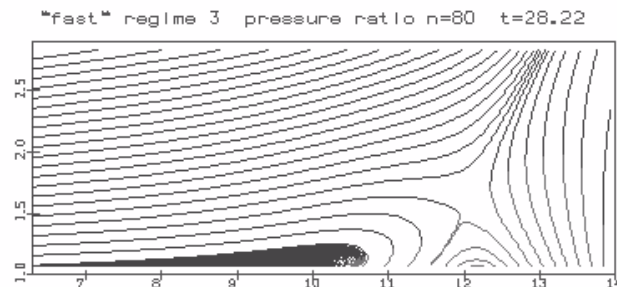


Рис.3б.

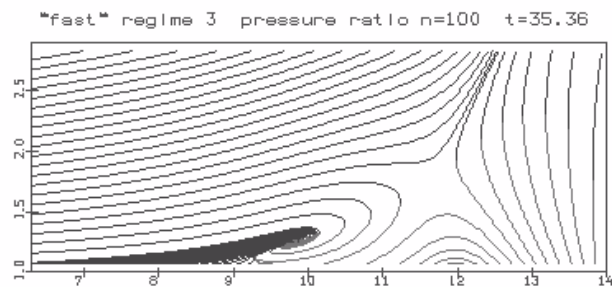


Рис.3с.

Рисунки, иллюстрирующие наиболее «быстрый» процесс повышения нерасчетности струи, представляют качественно новую картину течения в области взаимодействия. Здесь вместо эжекции вещества из внешнего потока струей происходит непосредственное втекание вещества струи в зону циркуляционного течения.

Следует заметить, что именно процесс зарождения и распада циркуляционной зоны и характерное время существования нестационарной структуры при различных скоростях изменения степени нерасчетности струи представляли наибольший интерес для автора. Исследовать этот процесс, обнаружить возникновение качественно новой картины течения при увеличении темпа повышения степени нерасчетности можно было только благодаря непрерывной пошаговой визуализации.

Аналогичным примером моделирования нестационарного процесса, где исследование нестационарной пространственно-временной

структуры проводится с помощью анимации процесса, может служить работа [5], где рассматривается задача свободной конвекции несжимаемой жидкости в камере с локальным теплообменом на горизонтальных плоскостях. Как и в предыдущем примере, возникающая нестационарная структура может быть обнаружена и изучена только благодаря применению алгоритмов визуализации.

Трехмерность моделируемого нестационарного процесса также создает существенные трудности при визуальном представлении результатов, особенно в тех задачах, где вычислитель не обладает какой-либо априорной информацией о характере течения. Традиционные представления трехмерного поля течения как набора параллельных или перпендикулярных сечений не дает полного представления о течении. В качестве примера приведем работы [6,7], где рассматриваются прямые и обратные задачи свободной конвекции от источника нагревания в закрытом объеме. В [6] рассматривается задача конвекции в объеме, внутри которого расположен источник тепла. В определенный момент времени источник «включается», воздух в окрестности источника тепла нагревается и начинается конвекционное пространственное вихревое движение в объеме, изменяющееся с течением времени. Движение воздуха в объеме моделируется на базе трехмерных нестационарных уравнения Навье-Стокса для сжимаемого теплопроводного газа.

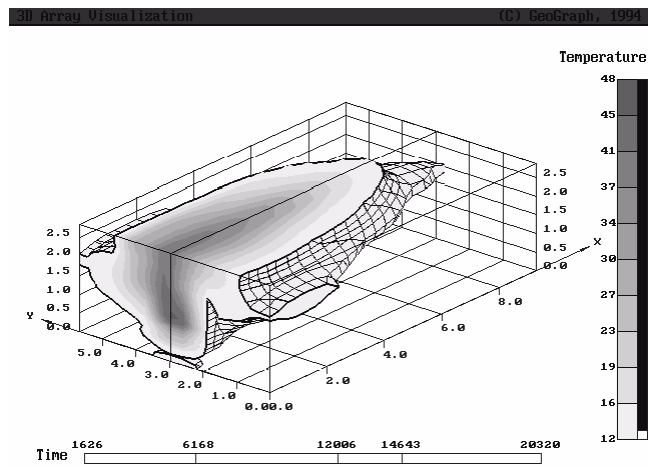


Рис.4.

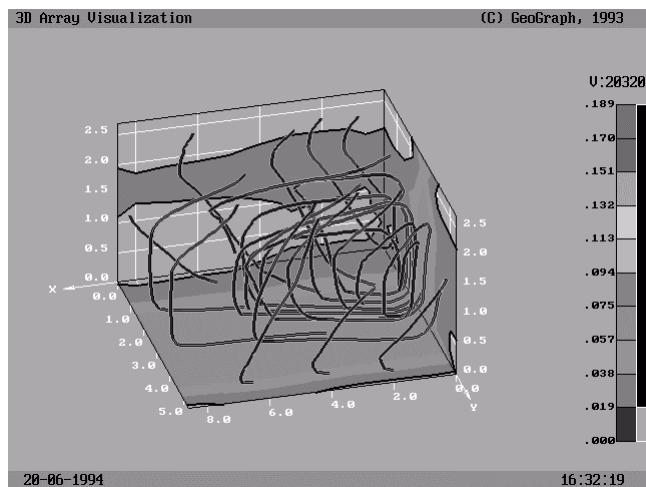


Рис.5.

На рисунках 4,5 течение в закрытом объеме представлено с помощью перпендикулярных сечений с распределением температур и изоповерхностей и линий тока, вдоль которых изменение температуры представляется различными цветами. Общая картина течения представляется достаточно четко, можно проследить большой вихрь возникающий в объеме. Однако уловить многие детали течения весьма затруднительно.

В [7] на базе прямой задачи, рассмотренной в [6], исследовалась возможность решения обратной задачи, т.е. по показаниям «датчиков», расположенных в различных точках объема восстановить местоположение начальную температуру и момент включения теплового источника. Это потребовало в плане визуализации помимо многократного решения прямой задачи с вариацией параметров параллельного графического построения поля невязок и поиска экстремумов в этом поле.

Таким образом, визуализация численных решений аэродинамических задач со сложными физическими процессами, обратных задач встречает ряд новых проблем, нуждающихся в разрешении.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Требования, предъявляемые современными задачами аэрогазодинамики переводят задачи визуализации в качественно новую роль. Визуализация в аэрогазодинамике становится не только иллюстративным средством, но полноправным инструментом познания.

Можно выделить некоторые основные функции визуализации, необходимые при решении вышеуказанных задач:

- качественный анализ численного решения;
- контроль процесса расчета численного решения

- интеграция с САПР для возможности расчета сложной геометрии

Следует отметить интенсивную работу, проводимую в этих направлениях многими исследователями. Так, например, система FlowVision [8], позволяющая работать со сложной геометрией и ориентированная на использование с САПР.

Характерным примером использования алгоритмов визуализации и обработки изображений для качественного анализа численных решений могут служить работы [9], [10]. В работе [9] авторы применяют методы определения ядра вихря для анализа поля данных, полученных в результате численного решения. Решаются задачи локализации точек схода концевых вихрей на крыльях. В работе [10] с помощью методов обработки изображений локализуются различные типы разрывов в поле течения.

Тем не менее развитие этих направлений находится на стадии отдельных разработок. Необходимо создание комплекса графических приложений, ориентированных на задачи аэрогазодинамики, столь нужного сейчас отечественному вычислителю. Следует отметить, что в подобный комплекс могли бы войти многие оригинальные алгоритмы и программы, разработанные вычислителями в области аэрогазодинамики на базе различных графических систем для визуального представления и анализа данных для своих классов задач. По проведенной автором приблизительной оценке можно сказать, что этот исследовательский потенциал на сегодняшний день используется в нашей стране от силы на 15 процентов.

Структура и принципы создания подобного комплекса могут являться предметом дальнейшего обсуждения.

4. ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Pang, H.-G. Pagendarm. «Visualization for Everyone», IEEE Computer Graphics and applications, v.18, N 4, 1998.
- [2] Ю.М.Баяковский, В.А.Галактионов, Т.Н.Михайлова. «ГРАФОР. Графическое расширение Фортрана» М., Наука, 1985.
- [3] А.Е.Бондарев. «Численное исследование взаимодействия сверхзвукового потока вязкого газа со спутной недорасширенной струей». Тезисы докладов Первой всесоюзной школы-конференции «Математическое моделирование в машиностроении». Куйбышев, 1990.
- [4] А.Е.Бондарев. «Численное решение уравнения Бюргерса в области высоких градиентов.» Препринт ИПМ им М.В.Келдыша РАН, М., № 12, 1990, 13 с.
- [5] А.Гудзовский, С.Клименко. «Визуализация свободно-конвективных течений в полости» Тр.ГРАФИКОН-98, М., МГУ, 1998, с.31-38.

- [6] А.К.Алексеев, А.Е.Бондарев, Е.Н.Бондарев, Ю.А.Молотилин. «Численное моделирование нестационарного теплообмена в закрытых объемах». Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, М., № 31, 1994.

- [7] A.K.Alexeev, A.E.Bondarev, Y.A.Molotilin. « On Inverse Problems for 3D Time-Dependent Free Convection Heat Transfer» Proc. of National Heat Transfer Conference ASME, v.10, 1995, p.113-122.

- [8] А.А.Аксенов, А.А.Дядькин, А.Ю.Сельвачев, В.И.Похилко, С.В.Клименко. «Визуальный анализ движения жидкости в системе FlowVision» Тр.ГРАФИКОН-98, М., МГУ, 1998, с.46-52.

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

- [10] С.Базаров. «Применение методов обработки изображений в вычислительной газодинамике» Тр.ГРАФИКОН-98, М., МГУ, 1998, с.258-264.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные задачи аэрогазодинамики формулируют новые задачи визуализации численных решений в этой области.

Иллюстрации получены при помощи комплекса ГРАФОР, разработанного под руководством Ю.М.Баяковского и комплекса GeoGraph, разработанного под руководством В.Н.Кочина, которым автор выражает свою признательность.

Автор:

Александр Бондарев научный сотрудник
Института прикладной математики им. М.В. Келдыша
РАН.

Адрес: 125047, Москва, Миусская пл., 4, Институт
прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН
Телефон: (095) 250-78-17
E-mail: bond@spp.keldysh.ru

Visualization in CFD: Problems of development

Visualization methods problems in the current CFD applications are considered. The approaches and requirements for visualization are analyzed according to CFD current problems.