

# Интерактивная анимация для визуализации движения жидкости

Аксенов А.А.  
Институт автоматизации проектирования РАН  
Москва, Россия  
Сельвачев А.Ю.,  
Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный М.о., Россия  
Клименко С.В.,  
Институт физики высоких энергий РАН.  
Протвино М.О., Россия

## Аннотация

Приводится описание группы интерактивных анимационных методов для визуализации сложных течений жидкости. Группа основана на анимации статических методов, таких, как изолинии, тоновая заливка на плоскости, вектора на плоскости и изоповерхности. Показано, что применение интерактивной анимации для визуализации течений жидкости и газа в индустриальных приложениях позволяет получать исследователю гораздо больше информации, чем традиционными неинтерактивными способами визуализации. Описываемые методы реализованы в системе *FlowVision* v2.0, предназначенной для моделирования трехмерных турбулентных движений жидкости. Приводится пример визуализации сложного течения жидкости в горелке тепловой электростанции.

**Ключевые слова:** численное моделирование, визуализация движения жидкости, интерактивная анимация.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Эффективные методы расчета уравнений гидродинамики, автоматические методы генерации трехмерной расчетной сетки, мощные рабочие станции и персональные компьютеры позволили решать широкий спектр практических задач, в которых основным процессом является движение жидкости (газа). Новые возможности повлекли за собой появление прикладного направления вычислительной гидродинамики, которое можно назвать индустриальной вычислительной гидродинамикой (ИВГД).

Характерной особенностью задач ИВГД являются два фактора – сложность поверхности рассматриваемого объекта и сложность математических моделей моделируемого объекта. Под сложностью поверхности будем понимать большой набор элементов этой поверхности, включаемых в процесс моделирования. Под сложностью математической модели понимается

большое количество явлений, учитываемых при проведении расчета. В совокупности эти два фактора определяют движение жидкости, которое далее будем называть сложным.

Чем сложнее движение жидкости, тем больше исследователь тратит время для анализа результатов расчетов. Чтобы сократить это время, необходима разработка новых средств анализа результатов расчетов. Перефразируя известную поговорку "хороший чертеж – половина решения задачи", можно с уверенностью сказать – "хорошая визуализация – половина анализа результатов". 10-20 лет назад, в эпоху расцвета моделирования плоских и осесимметричных течений, были разработаны наглядные и простые методы визуализации двумерных течений, такие, как изолинии, тоновая заливка, вектора в точках, треки жидких частиц [1]. Основное преимущество этих методов заключается в том, что они дают не только качественную, но и количественную информацию. Переход к трехмерным расчетам уничтожил эти преимущества двумерных методов визуализации. Чтобы визуализировать, т.е. понять сложное течение, необходимо уже не одна плоскость визуализации, причем чем сложнее течение, тем больше должно быть плоскостей. С другой стороны, большое количество перекрывающихся плоскостей только запутывают картину течения, приводя к ситуации, когда "из-за деревьев не видно леса".

Трехмерные расчеты вызвали к жизни трехмерные методы визуализации. Среди них наиболее популярны изоповерхности и объемная визуализация для изображения трехмерных распределений скалярных величин. Методы объемной визуализации (например, методы рисования тумана) имеют слишком качественную природу визуализации течения жидкости, чтобы видеть в них средство инженерного анализа. Скорее, это средство первого знакомства с общей картиной течения перед выяснением его количественных деталей, а также создания презентационных картинок.

Изоповерхности дают более количественную информацию о распределении скалярных величин, чем объемная визуализация. Однако, если принять во внимание, что в двумерном случае изоповерхности соответствует одна изолиния, становится понятным, что для полноценной визуализации требуется несколько изоповерхностей. В трехмерном случае построение нескольких изоповерхностей, закрывающих друг друга, бессмысленно.

Аналогичная проблема возникает с визуализацией движения жидкости треками частиц. Если в двумерном случае это мощный инструмент качественного представления течения жидкости, то сложное трехмерное течение создает только замысловатую самопересекающуюся кривую на экране компьютера.

Для трехмерной визуализации сложных течений создано множество различных методов [1-4]. Вместе с тем, практически ни один из этих методов не вошел в коммерческие программные комплексы моделирования движения жидкости, в которых используются двумерные методы визуализации, изоповерхности и построение треков частиц. Исключение составляют системы [5,6], в которых реализован ряд новых методов.

Возможно, путь к созданию методов "хорошей визуализации" лежит в применении анимации. Поясним на простом примере. Человек, чтобы лучше рассмотреть скульптуру, обходит ее со всех сторон. Инженер, чтобы рассмотреть в САПР геометрию устройства, вращает ее вокруг осей системы координат. Можно сказать, что в том и в другом случае человек анимирует картинку, находящуюся у него перед глазами.

Аналогичные принципы интерактивной анимации могут быть применены к классическим методам визуализации течений. В настоящей работе рассмотрены следующие методы: интерактивное движение и вращение плоскости при визуализации изолиниями, тоновой заливкой, векторами и графиком скалярной величины вдоль прямой, интерактивное изменение уровня скалярного поля при визуализации изоповерхностью.

Описанные методы реализованы в системе моделирования движения жидкости *FlowVision* [7]. Все иллюстрации статьи построены с ее помощью и являются обработкой результатов решения различных практических задач.

## 2. МЕТОДЫ ИНТЕРАКТИВНОЙ АНИМАЦИИ

Система отображения результатов расчетов программного комплекса *FlowVision* основана на механизме слоев визуализации. Этот механизм заключается в построении трехмерной сцены (3D-сцены) рисунка как набора картинок (слоев), генерируемых с помощью различных методов

визуализации. Таким образом, слой визуализации представляет собой единицу отображения 3D-сцены. Примерами слоев визуализации являются изоповерхность скалярной величины или плоскость с изолиниями. Слои независимы друг от друга и неделимы, то есть всегда отображаются целиком. Каждый из слоев имеет специфический, присущий только ему набор свойств - параметры слоя. Примерами параметров слоя являются: для изоповерхности — значение скалярной величины, по которому строится изоповерхность; для плоскости с изолиниями — коэффициенты ее канонического уравнения. Набор конкретных значений параметров задает объект-слой, который может быть отображен в 3D-сцене.

Рассмотрим такие параметры слоев, значения которых могут меняться непрерывно. Тогда изменение параметра слоя можно связать с движением манипулятора (например, мыши по экрану). С одной стороны, это позволяет облегчить задание параметров. С другой стороны, как было сказано выше, такая связь позволяет получить новое качество визуализации. Этот подход авторы настоящей работы назвали интерактивной анимацией.

## 3. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ГОРЕЛКЕ

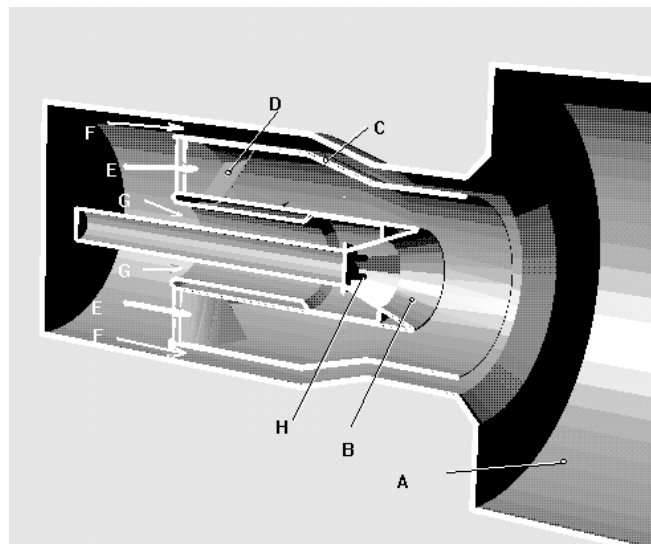


Рис.1 Схема горелки

На рис.1. представлена схема горелки для двухступенчатого сжигания метана [8]. В горелке имеются три коаксиальных канала движения воздуха E, F, G. В канале E к воздуху подмешивается метан и создается обогащенная топливная смесь. Лопатками D топливная смесь слегка закручивается. Канал F, отделенный от E перегородкой C предназначен для подачи чистого вторичного воздуха в котел A. Через канал G воздух подается на стабилизатор пламени B.

Для создания горючей смеси после стабилизатора, в его поток воздуха подмешивается небольшое количество метана через четыре трубки **Н**. В стабилизаторе создается сильная закрутка потока, при которой возникает "висящая" возвратная зона в потоке.

При проектировании описываемой горелки возникает ряд вопросов, которые должны быть разрешены численным моделированием течения. Одними из таких вопросов является выяснение параметров висящей возвратной зоны и скорости перемешивания метана с воздухом. Далее приведем использование метода интерактивной визуализации для этой цели.

### 3.1 Возвратная зона

Висящая возвратная зона возникает на оси сильно закрученного потока. Она представляет собой область течения с имеющимся в нем движением жидкости, противоположным основному потоку. Для качественного выяснения наличия возвратной зоны и ее объема применим визуализацию течения векторами скорости и тоновой заливкой компоненты скорости в плоскости.

Выберем плоскость, рассекающую расчетную область. Свяжем движение манипулятора со следующими движениями плоскости:

- вращением относительно точки с закрепленными в теле осями
- поступательным движением вдоль нормали к плоскости.

В первом случае угол поворота плоскости будет пропорционален смещению манипулятора, во втором — смещение плоскости вдоль вектора нормали пропорционально смещению манипулятора. При смещении манипулятора плоскость приходит в движение. Каждому новому положению плоскости соответствует новый рисунок. Если система визуализации позволяет перестраивать рисунок в реальном времени, можно наблюдать, как меняется изображение на плоскости в пространстве.

На рис. 2 изображены три положения плоскости рисунка с векторами скорости. При совпадении плоскости рисунка с центральной плоскостью горелки (верхний рисунок) хорошо видна висящая возвратная зона, втянутая в диффузор стабилизатора пламени **В** и выходящая из горелки на расстояние примерно полтора диаметров диффузора. При движении плоскости исследователь видит трансформацию этой зоны по глубине горелки. Остановившая плоскость рисунка в месте исчезновения обратного течения газа, исследователь может определить это расстояние по величине смещения плоскости.

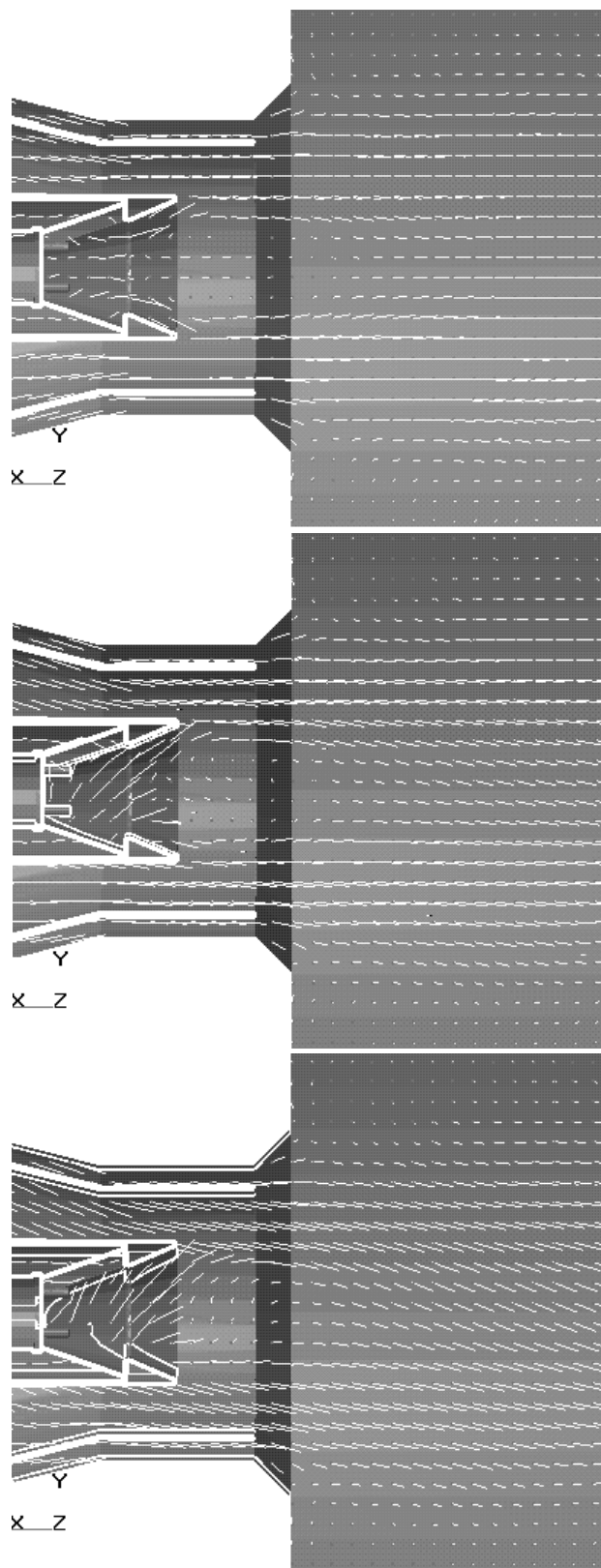


Рис. 2 Движение плоскости с вектрами.

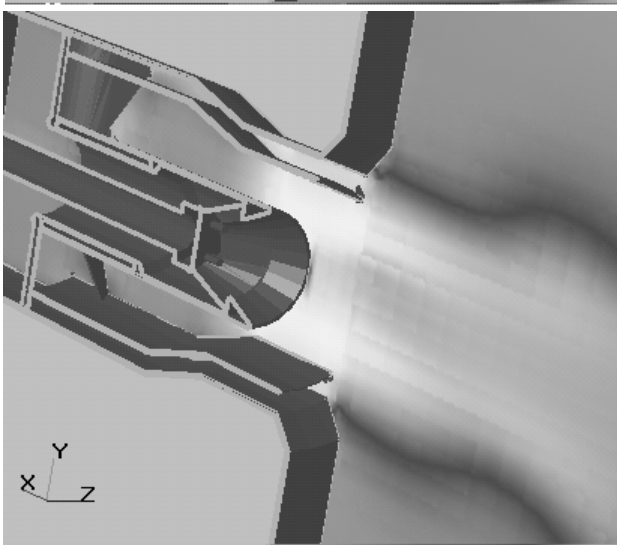
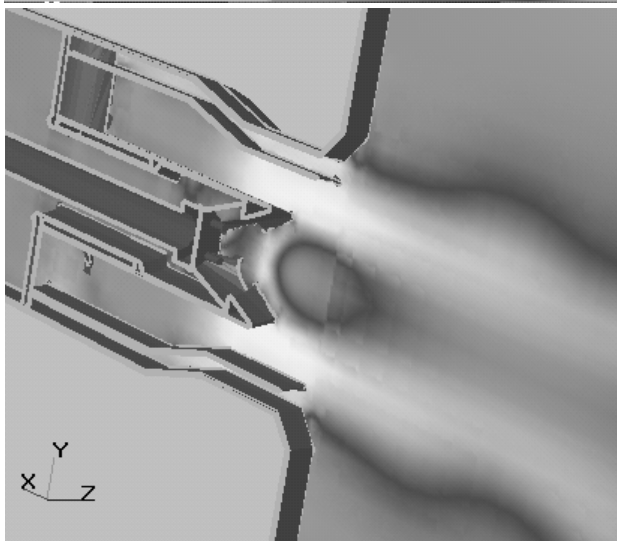
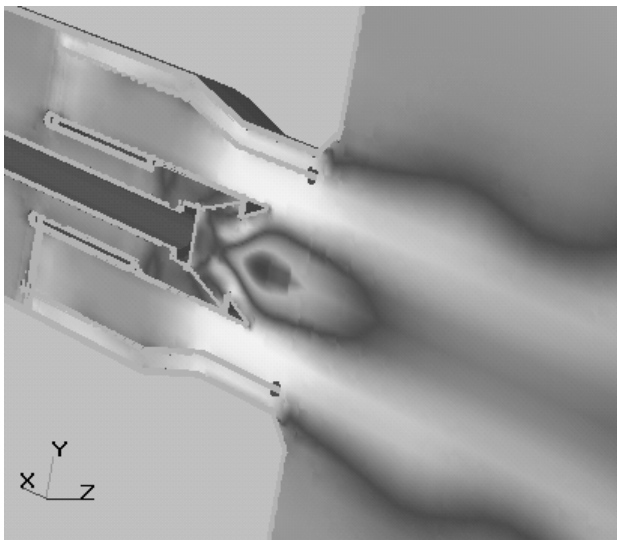


Рис. 3 Движение плоскости с тоновой заливкой по осевой компоненте скорости.

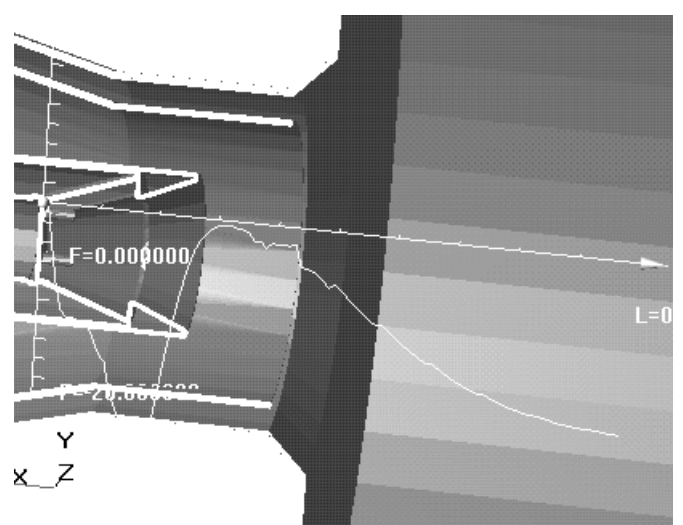
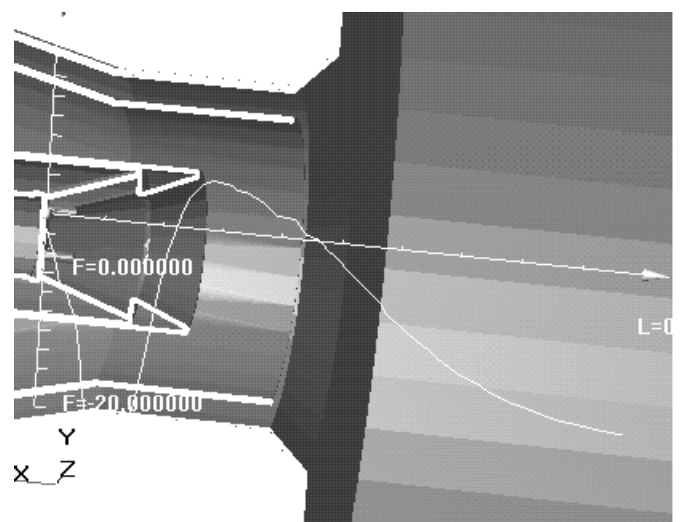
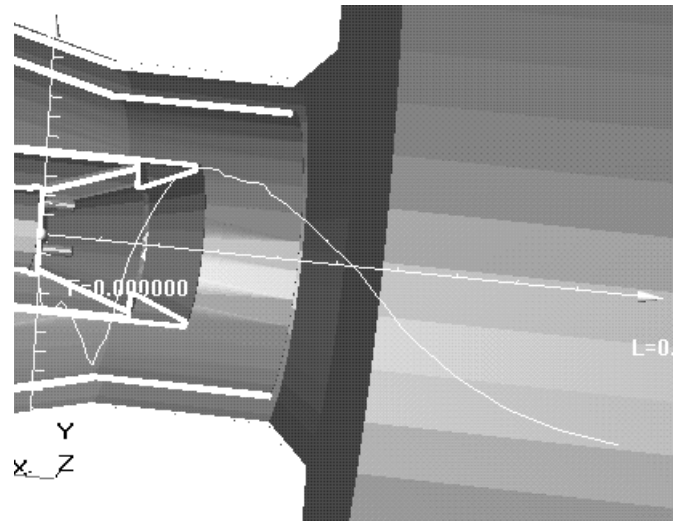


Рис.4. Движение графика зависимости осевой скорости от расстояния от начала стабилизатора вдоль оси.

В данной задаче основными интересующими параметрами висящей возвратной зоны является максимальная скорость обратного течения и протяженность в пространстве. Получить эту информацию можно, например тоновой заливкой по осевой компоненте скорости и графиком ее зависимости вдоль оси горелки. На рис. 3 изображено аналогичное рис. 2 движение плоскости рисунка с тоновой заливкой. В этом случае исследователь реагирует не только на форму зоны, выделенную цветом, но еще и на динамику изменения цвета при движении плоскости рисунка.

Выяснив с помощью рисунков в плоскости местоположение возвратной зоны, можно приступить к более детальному ее анализу с помощью графика зависимости осевой скорости вдоль осевой координаты (рис.4). При этом, кроме указанных ассоциаций между движением манипулятора и вращением и поступательным смещением плоскости графика, добавляется еще воздействие манипулятора на движение начала координат графика в плоскости рисунка. Пользуясь графиком, исследователь может получить изменение характера зависимости переменной вдоль линии в пространстве, в частности смещение и образование точек экстремума и перегибов. При этом ему в каждый момент движения графика известны значения экстремумов и точек перегиба и другая количественная информация.

### 3.2 Перемешивание метана и воздуха

Применим метод интерактивной анимации для исследования перемешивания метана, выходящих в стабилизаторе В из трубок Н. На рис. 5 показано движение плоскости с изолиниями концентрации метана. Верхний рисунок соответствует положению плоскости вблизи среза трубок, последующие рисунки соответствуют удалению плоскости от трубок вниз по потоку воздуха. Видно, что с удалением от среза трубок струи метана сливаются и перемешиваются. При перемешивании пропадают изолинии высокой концентрации метана. Исследователь, задав интересное его максимальное значение концентрации метана и передвигая плоскость, может легко определить границу исчезновения этой концентрации и установить расстояние от трубок, посмотрев смещение плоскости рисунка.

Сопоставим положению манипулятора уровень изоповерхности скалярной функции. При этом исследователь будет видеть изоповерхности большого количества различных значений, тут же сопоставляя их между собой. Для исследователя изоповерхность будет двигаться, причем ее различные участки будут двигаться с разной скоростью. Чем скорость движения участка изоповерхности больше, тем меньше градиент скалярного поля в данной области.

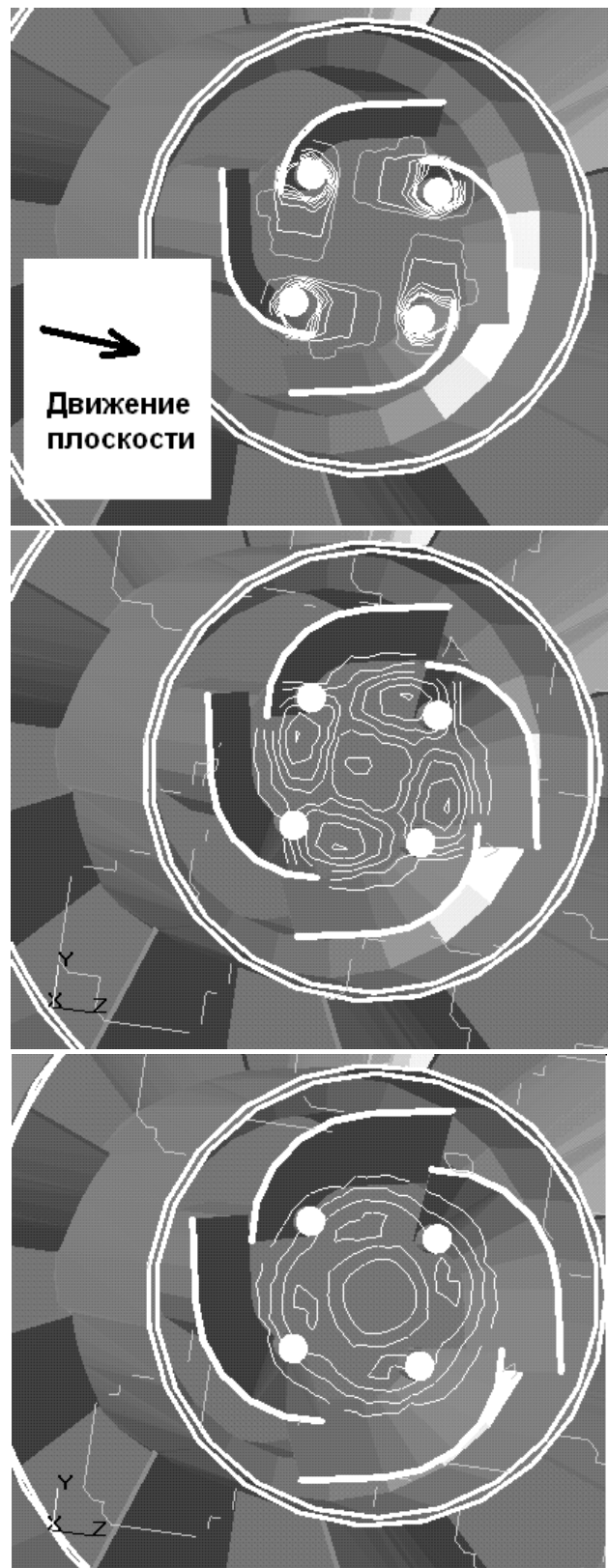


Рис. 5 Движение плоскости с изолиниями концентрации метана.

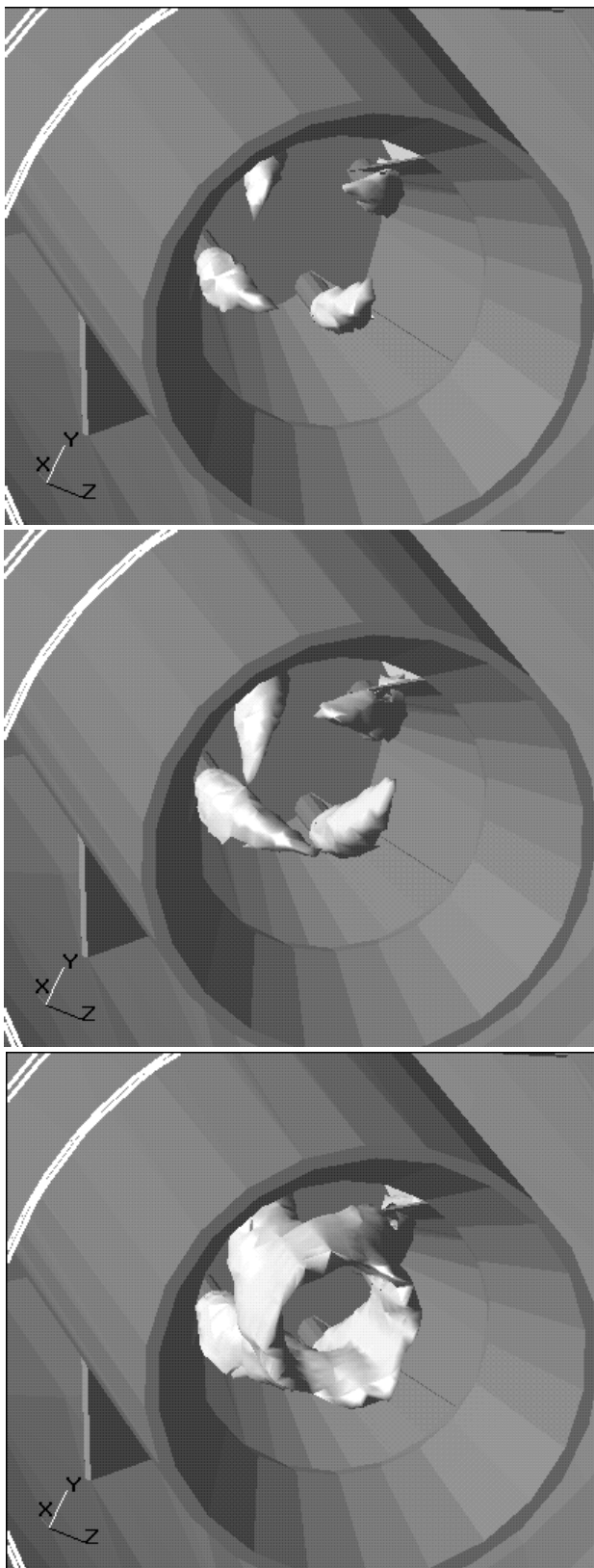


Рис. 6 Уменьшение уровня изоконцентрации метана.

На рис.6 показана динамика поверхности изоконцентрации метана в стабилизаторе. На верхнем

рисунке уровень изоконцентрации выше, чем на нижних. В первые моменты времени (два первых кадра) видны четыре остроконечные поверхности, очерчивающие струйки метана. Поскольку вдоль струи метана градиент его концентрации минимален, то заострение поверхности, имеющее максимальную скорость показывает оси струек метана. На третьем кадре запечатлен момент слияния струек в одну кольцевую струю метана, разбавленного воздухом.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, интерактивная анимация предоставляет новый и очень удобный набор средств для анализа сложных трехмерных течений жидкости. Этот подход объединяет в себе достоинства статических методов, на которых он базируется и дополняет их возможностями объемной визуализации. В статье был разобран пример сложного течения газа в горелке тепловой электростанции и продемонстрировано применение интерактивной анимации на основе следующих методов визуализации: изоповерхности скалярной величины, тоновой заливки на плоскости, изолиний на плоскости, векторов на плоскости, графика скалярной функции вдоль прямой. Анимация статических картинок, получаемых этими методами, вводится как изменение параметров этих методов в зависимости от движения манипулятора. В разобранных случаях она дала возможность произвести объемную визуализацию с получением количественных характеристик с помощью двумерных (в случае графика — одномерного) методов визуализации.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 98-01-00484 и № 99-01-00149.

#### 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tufte, E.R. (1990), *Envisioning Information*, Graphics Press, Cheshire.
- [2] Post, F.H., T.van Walsum (1993) *Fluid Flow Visualization: Focus on Scientific Visualization*, Springer Verlag, Berlin.
- [3] Hin, A.J.S. (1992) *A Study on Visualization for Fluid Flow Research*, report of Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- [4] Hin, A.J.S. (1994) *Visualization of Turbulent Flow*, CIP-DATA KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG.
- [5] Giles M. B. and Haines R., (1990), *Advanced Interactive Visualization for CFD*, Computing Systems in Engineering, 1(1):51 — 62.
- [6] Haines Robert, (1994), *pV3: A Distributed System for Large-Scale Unsteady CFD Visualization*, Department of Aeronautics and Astronautics Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139.

[7] Aksenov A. et al. (1998), *Visual analyzing fluid flows by FlowVision*, Proc. of the 8-th International Conference on Computer Graphics and Visualization "Graphicon-98", Moscow.

[8] Аксенов А., Похилко В., Тишин А. (1998) *Исследование двухступенчатого сжигания метана в вихревой горелке* Труды Второй национальной конференции по теплообмену, том 2, стр. 161-164.

### **Автор(ы):**

Андрей Аксенов, старший научный сотрудник  
Института автоматизации проектирования РАН  
Адрес: 2-я Брестская, 19/18, Москва, Россия  
Телефон: (095) 250-92-51  
E-mail: [flowvision@glas.apc.org](mailto:flowvision@glas.apc.org)

Александр Сельвачев, аспирант Московского  
физико-технического института,  
Адрес: Институтский пер. 9, Долгопрудный М.о.,  
Россия  
Телефон: (095) 250-92-51  
E-mail: [flowvision@glas.apc.org](mailto:flowvision@glas.apc.org)

Станислав Клименко, нач. отдела Института  
высоких энергий РАН  
Адрес: Протвино, Россия  
Телефон: (095) 258-38-01  
E-mail: [klimenko@mx.ihep.su](mailto:klimenko@mx.ihep.su)

A. Aksenov, A. Selvachev, S. Klimenko

## **Interactive animation for fluid flow visualisation**

Description of group of animation methods for fluid flow visualization is presented. Group is based on animation of static visualization methods as isolines, flood filling and vectors on plane, isosurface and plot by interactive changing parameters of pictures. It is shown that use of interactive animation is allowed to receive much more information then traditional two-dimensional methods. Described methods are implemented in CFD code *FlowVision* v2.0, destined for simulation complex three dimensional fluid flows. Example of visualization of complex flow in power station burner by interactive animation methods is presented.