

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ ПРИ ДО- И СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ

Кузнецов В.И., Грязнов С.В.

Омский государственный технический университет, г. Омск

Во многих случаях для составления двух- и трехмерной физической модели течения газа необходимо знать траекторию его движения (например: вихревая труба с использованием эффекта Ранка, камера сгорания воздушно-реактивного двигателя, течения газа в межлопаточном пространстве турбины, тупиковая полость в до- и сверхзвуковом набегающем потоке). С этой целью проводились эксперименты по определению составляющих скорости потока газа в различных сечениях вихревой трубы, а также визуализация потока. Измерение компонентов скорости потока газа в различных точках давало локальную картину движения, но по ней трудно было составить общее представление о закономерности течения газа во всем объеме камеры энергетического разделения. Визуализация закрученного потока с помощью источников света высокой интенсивности, теневых методов, подмешивания дыма к потоку, трассирующих частиц, голографии, спектроскопии, интерферометрии, лазерных методов измерения скорости и размеров частиц не смогла дать общей картины движения газа в вихревой трубе.

Только применение для визуализации потока горящих частиц магния с фиксацией их движения скоростной кинокамерой позволило дать общую картину течения газа в вихревой трубе. Таким образом, в настоящее время метод визуализации потока горящими частицами [1] с фиксацией их движения скоростной кинокамерой является единственным, с помощью которого можно определить пространственную картину течения закрученных потоков.

Визуализация проводилась для определения качественной картины течения газа внутри тупиковой полости, особенно в окрестности входа, где должен существовать интенсивный массообмен, а также по длине полости. Точная количественная оценка по результатам визуализации оказалась невозможна, поскольку частота колебаний давления в полости и максимально возможная частота съемки с помощью камеры, при которой происходила фиксация изображения частиц на пленке, имеют одинаковый порядок величины. Однако, данный метод позволил приблизительно определить угол, под которым поток входит в полость, глубину его проникновения внутрь полости и преимущественный характер движения.

Схема размещения камеры относительно модели и источника горящих частиц магния показана на рис. 1. Съемка проводилась с помощью специальной установки СК-2, включающей в себя камеру – 1 и

видеокамеры Samsung CLM VP-U12 с автоматической фокусировкой и установкой скорости затвора (рис.2). В первом случае частота съемки составляла  $1800 \dots 3600 \text{ с}^{-1}$  и определялась исходя из спектральной яркости частицы, скорости ее движения, оптических характеристик камеры, масштаба съемки, согласно данным технического описания камеры и рекомендациям [6], во втором случае частота съемки составляла  $25 \text{ с}^{-1}$ . Расстояние  $L_f$  от выходного зрачка системы до оси полости 2 (см. рис. 1) определялось исходя из угла поля зрения камеры в горизонтальной и вертикальной плоскости (данные технического описания) и размеров полости. Съемка с помощью установки СК-2 велась в по кадровом режиме. С помощью блока управления 3 и блока измерения 4 задавался режим работы установки, частота съемки, выдержка и др. параметры. Для ввода раскаленных частиц магния в поток, в точке, где срез сопла 7 опирается на направляющую плоскость 5, было сделано отверстие 6 диаметром 4.4 мм под углом  $45^\circ$  к плоскости в сторону входного отверстия полости. Источник частиц располагался под направляющей плоскостью рядом с отверстием. Вследствие, эжекции окружающего воздуха через отверстие, раскаленные частицы магния «захватывались» этим воздухом и через отверстие поступали в набегающий поток, создаваемый соплом 7. Вследствие, расположения оси симметрии полости 2 и центра отверстия 6 на одной линии практически все частицы поступали на вход в полость.

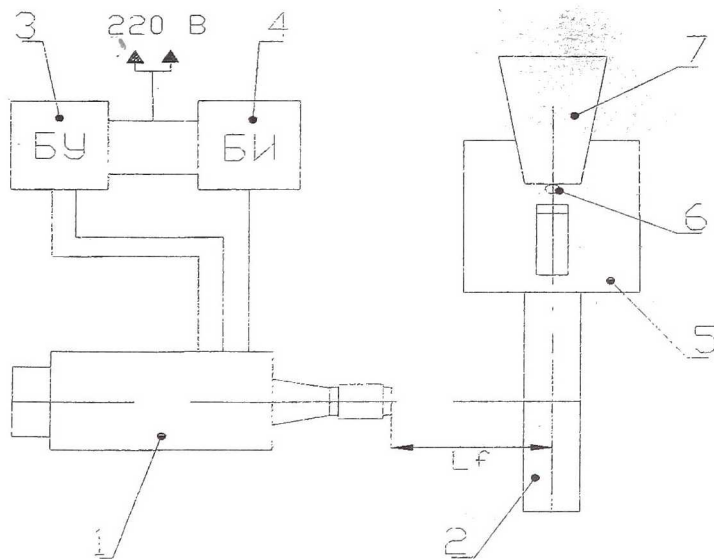


Рис. 1. Схема размещения камеры

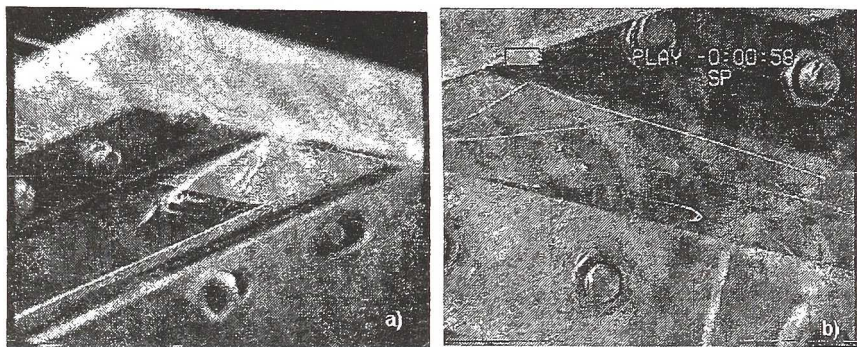


Рис. 2. Визуализация течения внутри полости: а)  $d_s=0,0114$  м;  $\bar{L}_T=12$ ; б)  $d_s=0,0114$  м;  $\bar{L}_T=36,7$

Несколько кадров кино съемки приведены на рис. 3. Временное расстояние между кадрами съемки составляет 1.1 мс, вход в полость расположен с левой стороны снимка. Вследствие малого коэффициента пропускания оптической системы установки 0.02, а также малой экспозиции 0.11 мс на пленке отсутствует фоновое изображение (в том числе изображение полости), поэтому на снимке видны только светящиеся частицы бенгальского огня.

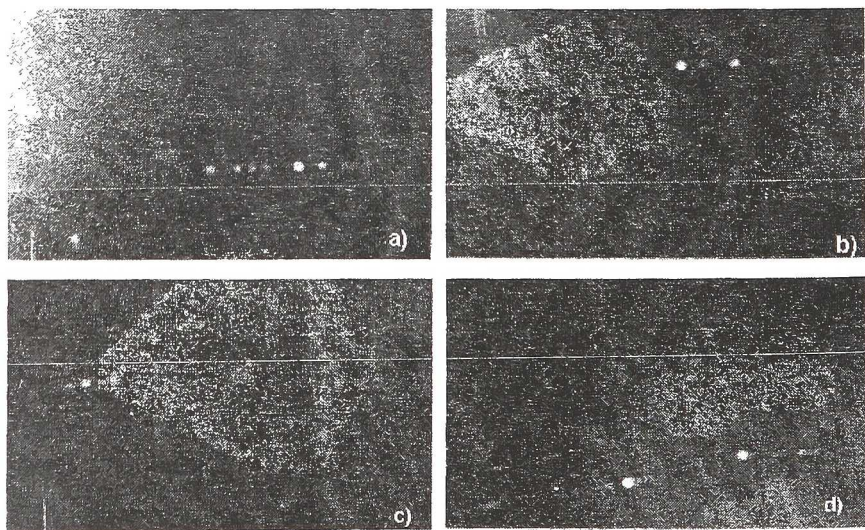


Рис. 3. Визуализация течения внутри полости:  $d_s=0,0114$  м;  $\bar{L}_T=12$

Направление движения частицы на фотографии можно определить по инверсионному следу, который она оставляет в потоке за собой. На фотографии а) частица перемещается внутрь полости в момент ее заполнения, затем происходит истечение воздуха из полости и на фотографии б) частица двигается в сторону входа. Фотографии с) и д) демонстрируют следующий цикл колебательного процесса. При этом, на фотографии д) видно начало истечения из полости – частица справа двигается в сторону входа полости, а направление течения у входа в полость еще не успело измениться – частица слева двигается внутрь полости. Траектории движения частиц практически прямолинейны и направлены вдоль оси полости, что говорит о преимущественно возвратно-поступательном движении воздуха внутри полости.

Визуализация течения внутри полости наглядно показывает, что вместо предполагаемой колеблющейся границы раздела на входе полости (как считалось ранее) существует закрученный поток проникающий глубоко внутрь.

Другой пример применения данного способа визуализации относится к исследованиям эффекта Ранка в вихревой трубе. Характер течения газа в вихревой трубе позволил провести количественную оценку полученных результатов. Подробности этой работы изложены в монографии [7]. Кинокамера производила съемку с частотой 4000 кадров в секунду. Время экспозиции одного кадра составляло  $\tau = 5 \times 10^{-5}$  с. Съемка производилась в двух положениях кинокамеры: вдоль оси вихревой трубы (оси кинокамеры и вихревой трубы были совмещены, рис. 4); перпендикулярно оси вихревой трубы.

Скоростная киносъемка показала, что поток газа в вихревой трубе движется по винтовой линии. Шаг винтовой линии увеличивается по мере удаления потока газа от входного тангенциального сопла. Движение горячей частицы имело форму окружности при съемке вдоль оси вихревой трубы, при съемке перпендикулярно оси вихревой трубы – форму синусоиды. Частицы, находящиеся ближе к оси вращения, движутся с большей угловой скоростью, чем частицы, находящиеся на большем расстоянии от оси. Характер изменения угловой скорости по радиусу вихревой трубы (рис 5.) позволяет сделать вывод, что в вязкой жидкости кинетическая энергия может передаваться от газа, вращающегося с большей угловой скоростью, к газу вращающемуся с меньшей угловой скоростью. Тарировка движения частиц в потоке при истечении газа из дозвукового сопла со сверхкритическим отношением давлений производилась до и после сопла с фиксацией его на пленку скоростной кинокамеры.

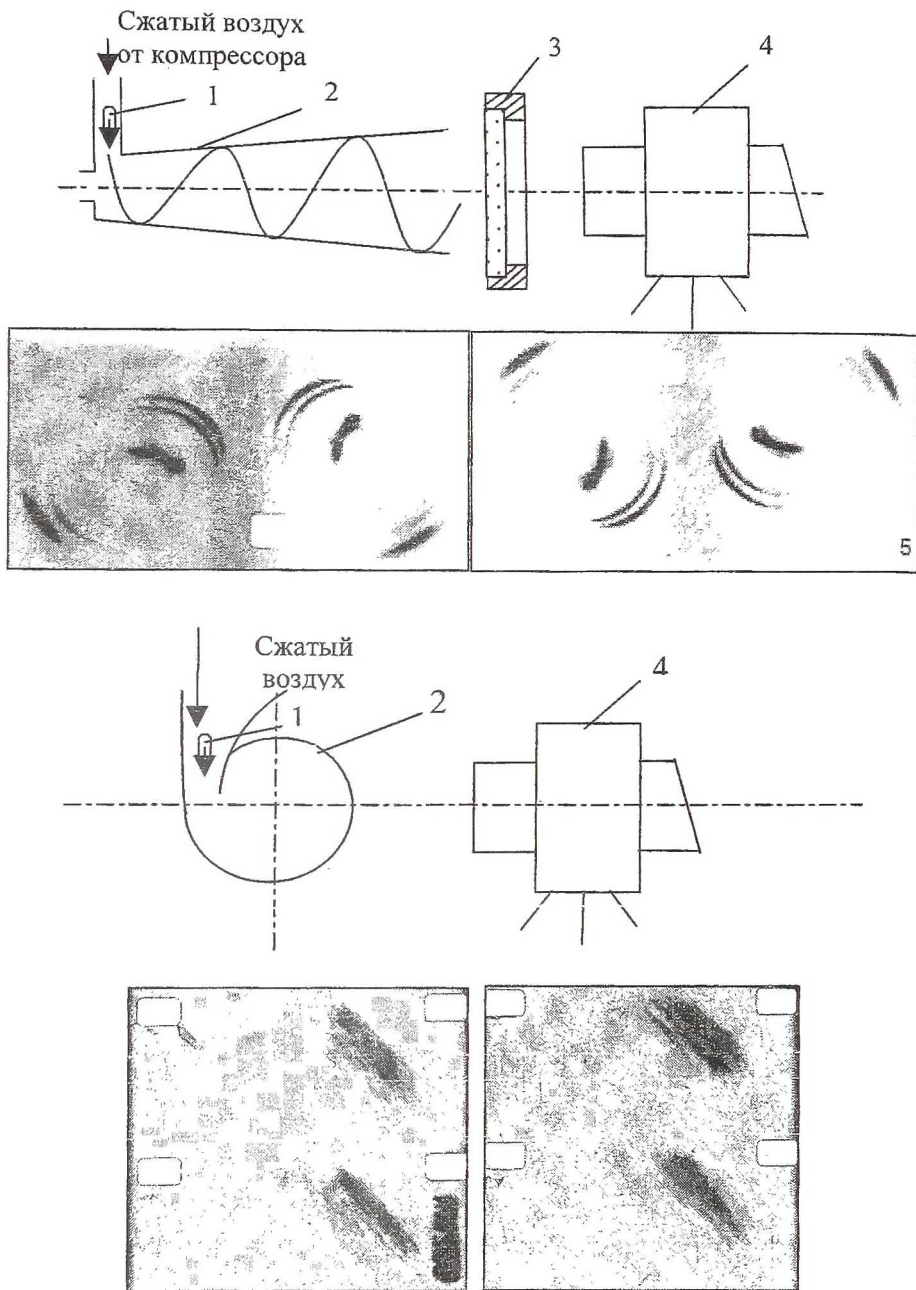


Рис. 4. Визуализация эффекта Ранка в вихревой трубе

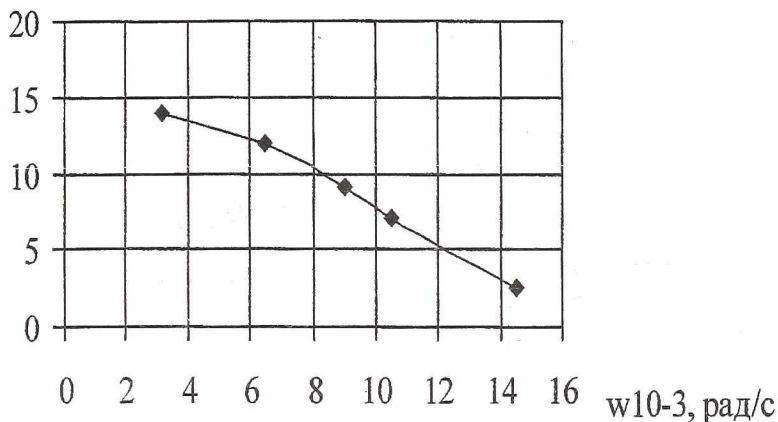


Рис. 5. Изменение угловой скорости потока газа по радиусу вихревой трубы

По результатам теоретических исследований и практического применения данного способа визуализации течения газа можно сделать следующие выводы.

1. Данный способ визуализации позволяет получить картину течения в случае сложных трехмерных течений.
2. Разработанный метод визуализации применим в широком диапазоне скоростей потока газа от дозвуковых до сверхзвуковых. Метод позволяет получить количественные результаты.
3. Техническая реализация данного способа требует на порядок меньших затрат чем оптические методы визуализации.

#### Список литературы

1. Патент № 2117298 Способ определения траектории вихревого движения газа / Кузнецов В. И., Яковлев А. Б., Макаров В. В., // 1998 Бюл. № 3.
2. Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М. 1984.
3. Кузнецов В. И. Теория и расчет эффекта Ранка: Науч. издание. – Омск: Изд. ОмГТУ, 1994. – 217 с.