

## О ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТЕЙ ЧЕРЕЗ СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

© 2006 Н.Д. Быстров, Н.Ю. Ильясова, Б.В. Миронов, А.В. Устинов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Авторами разработана конструкция испытательной камеры для лазерно-оптической визуализации пульсирующих течений жидкостей через сосредоточенные гидравлические сопротивления и технология проведения натурального эксперимента с одновременной регистрацией визуализированных течений

Визуализация течений жидкостей и газов как метод исследования в энергомашиностроительном эксперименте находит все большее применение в связи со своей наглядностью и большой информационной насыщенностью, что в свою очередь позволяет решать вопросы совершенствования двигателей летательных аппаратов, получать достоверную информацию о процессах, протекающих в элементах энергетических установок.

В настоящее время сложилось целое научное направление со своими методами лазерной визуализации и регистрации визуализированных течений. К сожалению, в научной литературе практически нет материалов, посвященных визуализации течений через разного рода гидравлические сопротивления, которые достаточно широко применяются в агрегатах систем управления двигателями летательных аппаратов. Помимо сказанного, остается несомненной актуальность работ в области подавления вынужденных колебаний в трубопроводных системах двигателей летательных аппаратов.

В этой связи представляет большой интерес визуализация периодических течений через разного рода местные сопротивления, например, жиклеры, диафрагмы, что в свою очередь может дать ценные сведения для конструктора агрегатов систем управления, а также элементов демпфирования вынужденных колебаний жидкостей для повышения качества регулирования, эффективности демпферов (гасителей) и снижения гидравлических потерь, возникающих за счет стационарного потока.

Авторами доклада разработана конструкция испытательной камеры для лазерно-оптической визуализации пульсирующих течений жидкостей через сосредоточенные гидравлические сопротивления и технология

проведения натурального эксперимента с одновременной регистрацией визуализированных течений (рис. 1).

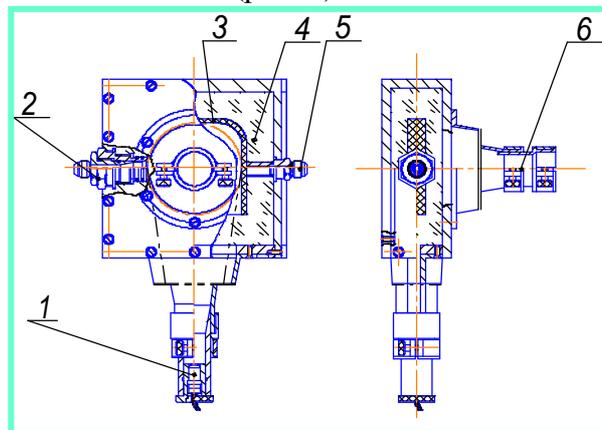


Рис. 1. Общий вид камеры визуализации:  
1 – лазерный излучатель; 2 – входной штуцер; 3 – поглощающее покрытие; 4 – оптическая вставка; 5 – штуцер для вывода жидкости из камеры визуализации; 6 – крепление для блока регистрации изображения

Для типового течения, имеющего место при пульсирующем течении жидкости через острокромочную диафрагму (рис. 2), составлен алгоритм и программа для РС, позволяющая получать основные характеристики течения по их визуализированным изображениям.

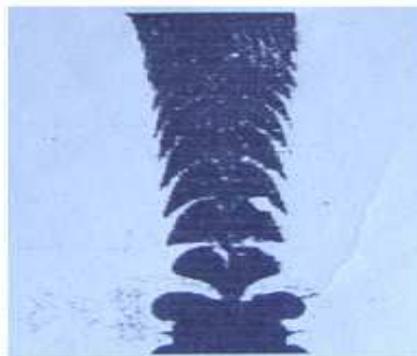


Рис. 2. Визуализированное пульсирующее истечение жидкости через диафрагму без искривления оси струи

Алгоритм обработки изображения течения жидкости через диафрагму содержит следующие процедуры вычисления характеристик изображения пульсирующего течения жидкости:

- оценку прямолинейности оси струи;
- подсчёт числа визуализированных вихревых структур на изображении с целью последующей оценки частоты пульсирующего течения через диафрагму;
- оценку площади поперечных сечений визуализированных вихревых структур и определение зависимости площади от номера вихря;
- нахождение угла раскрытия струи, вытекающей из диафрагмы и состоящей из отдельных вихрей;
- оценку радиуса кривизны отдельных вихрей по фронту и тылу вихря;

Предложенные реальные изображения вихревых структур характеризуются недостаточно высокой чёткостью, поэтому в качестве характерного изображения для разработки программы использовалось смоделированное (на базе предложенных) изображение, которое показано на рис. 3.



Рис. 3. Пульсирующее истечение жидкости через диафрагму

Ниже дается описание процедур оценки геометрических характеристик пульсирующей струи.

#### **Оценка прямолинейности оси струи**

При вычислении приведенных выше характеристик существенно используется тот факт, что ось изображения струи жидкости (рис. 2) близка к вертикальному положению. В связи с этим сформирована специальная структура данных, используемая в дальнейшем не только при оценке характеристики прямолинейности, но и подсчёте других па-

раметров. Для каждой строки изображения фиксируются границы струи - точки перехода от фона к анализируемому объекту и наоборот, а также количество таких переходов.

Используя сформированный массив данных, можно найти точки, лежащие на оси струи. Это середина сечения объекта, если переходов *два* (горизонталь пересекает только саму струю) или середина центрального сечения объекта, если переходов *шесть* (горизонталь пересекает струю и оба лепестка - правый и левый). Если переходов *четыре*, то такие строки *пропускаются*. Прямолинейность производится сравнением трёх длин: *хорды, ломаной и дуги*. В нашем случае хорда - отрезок, соединяющий точки оси струи в первой (нижней) и последней строках. Ломаная - линия, соединяющая поочередно точки оси на всех строках, кроме пропущенных. Для вычисления длины дуги производится процедура МНК (метод наименьших квадратов) - аппроксимация точек оси параболой. Начальная и конечная точки дуги определяются из условий пересечения параболой нижней ( $y=0$ ) и верхней ( $y=Vs-l$ ) строк. Аналитически длина дуги выражается формулой:

$$l = \frac{1}{4a} \left[ t \sqrt{t^2 + 1} + \ln \left( t + \sqrt{t^2 + 1} \right) \right]_{t_1}^{t_2},$$

где,  $t_1 = 2ax_1 + b; t_2 = 2ax_2 + b$ ,  
 $x_1, x_2$  - X-координаты *левой и правой* крайних точек дуги.

#### **Подсчёт числа лепестков и частоты пульсирующего течения**

Из рис. 3 видно, что лепестки струи - это участки локальных максимумов толщины струи. Толщина вычисляется как расстояние между крайними границами, если переходов два или шесть. Обнаружение лепестков производится в два этапа: поиск участков, на которых могут быть лепестки и исключение ложных участков.

Границы потенциальных участков определяются как номера строк, характеризующих наличием объекта, толщина у которого является локально минимальной. Чтобы не пропустить самый нижний лепесток, на нижней строке толщина предполагается равной ширине изображения. Среди

полученных участков существует много ложных. Они соответствуют колебаниям толщины между лепестками в той части струи, где лепестки выражены отчётливо. Также ложные участки имеются в верхней части струи, где лепестки сливаются (это хорошо видно на реальном изображении).

Ложные участки характеризуются малой разницей между максимальной и минимальной толщиной струи. Поэтому используем следующий критерий их поиска - участок считается ложным, если максимальная толщина *менее чем вдвое* больше минимальной. Данные участки не отбрасываются, а объединяются с истинными. Для использования в дальнейшей обработке фиксируются границы истинных участков. Для обработки не используется самый нижний участок струи, который соответствует диафрагме. Количество лепестков равно количеству истинных участков.

Частоту пульсирующего течения будем считать равной частоте появления лепестков на струе. Для этого внутри каждого истинного участка (в том числе и с диафрагмой) определим строку, на которой толщина максимальна. Номер этой строки принимается за  $Y$ -координату лепестка. Пространственная частота течения вычисляется следующим образом:

$$\omega = \frac{N}{y_N - y_0},$$

где  $N$  - число лепестков (без диафрагмы), а  $y_0$  -  $Y$ -координата диафрагмы.

Так как в программе координаты измеряются в пикселах, частота вычисляется в обратных пикселах. Если известен масштаб ввода изображений, можно получить частоту в обратных миллиметрах, если дополнительно знаем скорость истечения, то частоту можно получить в герцах.

#### **Оценка площади поперечных сечений вихревых структур**

Чтобы оценить площади поперечных сечений лепестков, предварительно необходимо разделить изображение струи на участки, найденные выше, и произвести раскраску полученных объектов. Разделение изображения производится путём закраски цветом фона (белым) строк с номерами, равными

границам участков. Если число лепестков  $N$ , то получим  $N+3$  отдельных объекта.

Считая снизу вверх, это начальный участок струи, диафрагма,  $N$  лепестков и "хвост". При подсчёте площадей мы должны знать, какому объекту принадлежит пиксел, поэтому производим раскраску объектов по алгоритму рекурсивной заливки. Цвет заливки равен номеру объекта, начиная с единицы для самого нижнего (рис. 4).

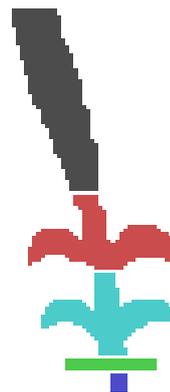


Рис. 4. Изображение истечения жидкости после раскраски объектов

Площади объектов, содержащих лепестки, определяются путём подсчёта пикселей заданной яркости. Однако необходима только площадь самого лепестка без центральной струи. В качестве приближённого значения площади лепестка используем площадь всего объекта, уменьшенную на площадь центральной струи. Последнюю оцениваем как площадь параллелограмма с основанием, равным длине линии разреза, и высотой, равной расстоянию между вертикальными границами объекта.

#### **Нахождение угла раскрытия струи**

Под углом раскрытия струи понимаем угол между левой и правой огибающими лепестков. Уравнения огибающих (достаточно знать только угловой коэффициент) строятся в зависимости от числа лепестков без диафрагмы. В случае отсутствия лепестков программа выдаёт сообщение о невозможности вычисления угла. Если лепесток один, то огибающей считается прямая, проходящая через край лепестка и нижнюю точку оси струи. При двух лепест-

как огибающая соединяет края одноимённых лепестков. Если лепестков более двух, то огибающая получается путём МНК-аппроксимации краёв лепестков прямой. Когда угловые коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  огибающих известны, угол между ними определим следующим образом:

$$\alpha = \arctg \frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 \cdot k_2}.$$

#### **Оценка радиуса кривизны по фронту и тылу лепестка**

Предположим, что струя распространяется снизу вверх. В этом случае фронтом лепестка будет его верхний край, а тылом - нижний. Будем считать, что каждый лепесток имеет две части - левую и правую. Возникает задача отделения лепестка от центральной струи. Вырезание центральной струи производим следующим образом. Строим левую и правую ограничивающие струю прямые, соединяя левые (правые) точки на нижней и верхней границах участка с лепестком. Получив уравнения этих прямых, мы стираем точки объекта, лежащие между ними (рис. 5).

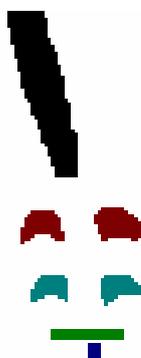


Рис. 5. Изображение картины истечения жидкости после отделения лепестков

После отделения лепестков определяются точки, принадлежащие фронту и тылу. Однако найти оптимальную оценку радиуса кривизны не удается.

Теоретически оптимальным приёмом была бы аппроксимация окружностью, но в отличие от случая, описанного в [3], мы не знаем центра окружности. Одновременное МНК-оценивание и координат центра и радиуса приводит в громоздкой системе нелинейных уравнений, которая не решается

аналитически и имеет девять различных решений. Можно обойтись без аппроксимации, вычисляя мгновенное значение кривизны по её определению:

$$K = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}}.$$

Производные считаются по разностным схемам, значения кривизны усредняются по всем точкам края лепестка, радиус вычисляется по формуле:

$$R = 1 / K_{sr}.$$

Отметим, что такой способ усреднения надёжнее усреднения самих радиусов, так как усреднять лучше величины, лежащие в сравнительно узком диапазоне, а мгновенный радиус кривизны на прямолинейных участках равен бесконечности. Но математические эксперименты показали, что дискретность пикселей сильно искажает значения производных, а следовательно и мгновенной кривизны. Поэтому было найдено *компромиссное* решение. Мы аппроксимируем край лепестка параболой, у которой в отличие от окружности радиус кривизны *не является константой*. (В нашем случае это не слишком искажает результат, так как центральный угол дуги мал.)

Далее поступаем, как при использовании разностных схем, но усреднение кривизны производится аналитически. Приведём расчётные формулы для среднего радиуса кривизны:

$$\bar{K} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} K(x) dx = \frac{1}{x_2 - x_1} \left[ \frac{t}{\sqrt{1+t^2}} \right]_{t_1}^{t_2}; R = 1 / \bar{K},$$

где  $t_1 = 2ax_1 + b; t_2 = 2ax_2 + b,$

$x_1, x_2$  - X-координаты левой и правой точек края лепестка.

Программа выдаёт для каждого лепестка радиусы кривизны фронта и тыла левой и правой частей. Отрицательное значение означает, что лепесток имеет выпуклость вверх.

#### **Программа обработки изображения течения жидкости через диафрагму**

Описанные в предыдущем разделе алгоритмы реализованы в программе STRUI.

Эта программа имеет следующую командную строку:

STRU1.EXE <ФайлИз>,

где <ФайлИз> - файл исходного изображения истечения струи типа показанного на рис. 3.

После запуска программы на экране высвечивается исходное изображение. При последовательном нажатии произвольной клавиши на экран выдаются значения параметров, а изображение принимает вид рис. 4 и рис. 5. Финальный экран программы выглядит следующим образом: изображение вида рис. 5 и под ним перечень параметров и их значений.

### Список литературы

1. Журавлев О.А., Быстров Н.Д., Мединская Л.Н. Лазерный стенд для диагностики форсунок. Сб. тезисов докладов Международной научно-технической конференции, Самара, 1997.- С. 71.

2. Шорин В.П., Гимадиев А.Г, Быстров Н.Д. Гидравлические и газовые цепи передачи информации – М.: Машиностроение, 2000. 328 С.

3. Быстров Н.Д., Ильясова Н.Ю., Мединская Л.Н., Устинов А.В. Оценка геометрических характеристик факела распыливания топлива центробежными форсунками малого перепада давления. -Депон. В ВИНТИ №2926-В-98, от 05.10.98. –12 с.

## ABOUT VISUALIZATIONS PULSING CURRENTS of the LIQUIDS THROUGH CONCENTRATED RESISTANCE

© 2006 N.D. Bystrov, N.Yu. Iliysova, B.V. Mironov, A.V. Ustinov

Samara state space University

At present formed the integer scientific direction, resting in methods of the lazer visualization and registrations visual's currents . The Author of the report is designed design of the test camera for lazer-optical visualization pulsing currents of the liquids through concentrated hydraulic resistances and technology of the undertaking natural experiment with simultaneous registration visual's currents. For standard current, existing under pulsing current to liquids through thin diaphragm, is formed algorithm and program for RS, allowing get the main features of the current upon their visual's to scenes.