

УДК 621.431.75+533.6.011.32

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОЙ ГАЗОВОЙ СТРУИ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

© 2011 Ю. А. Кныш, Е. С. Редькин, Д. Н. Дмитриев

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Закрученные струйные течения широко используются в целях интенсификации тепломассообмена и горения в ракетных и газотурбинных двигателях, промышленных камерах сгорания, системах охлаждения и т.д. В последнее время появились новые средства экспериментального исследования сложных струйных течений. Среди них своими преимуществами выделяется метод трассерной визуализации PIV (Particle Image Velocimetry), который позволяет получать панорамные «срезы» распределения векторов скорости, линий тока, завихренностей и других параметров течения. В данной работе изложены некоторые результаты использования метода PIV при исследовании нестационарной закрученной газовой струи.

PIV (Particle Image Velocimetry), трассерная визуализация, струи, закрученный газовый поток, векторное поле, линии тока.

Закрученные газовые струи отличаются высоким уровнем турбулентных пульсаций и образованием периодических крупновихревых структур, связанных с явлением прецессии вихревого ядра [1]. Сложная структура и крупномасштабная нестационарность движения закрученных струй существенно осложняют как теоретическое, так и экспериментальное их исследование. С появлением новых технологий экспериментального исследования нестационарных течений жидкости и газа открылись и новые возможности изучения тонкой структуры закрученных струй.

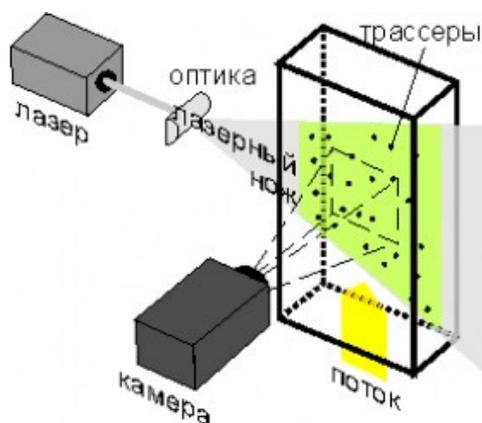


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая принцип работы PIV метода

Одним из наиболее совершенных методов лазерной диагностики течений является использованный в данной работе метод PIV (Particle Image Velocimetry) (рис. 1).

Метод цифровой трассерной визуализации, относящийся к классу бесконтактных оптических методов, позволяет регистрировать мгновенные поля скоростей в плоскости измерения в отличие от традиционных одноточечных методов исследования потока. Важнейшими из его преимуществ являются: отсутствие возмущающего влияния на поток и широкий динамический диапазон измеряемых скоростей [2, 3].

Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). Измерительной областью потока считается плоскость, "вырезаемая" световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды. Образы частиц регистрируются на цифровую камеру. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать

смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трёхмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей образы частиц камеры. Для измерения трёх компонент скорости используют две камеры, оптические оси которых ориентированы под определённым углом относительно друг друга.

К ограничениям PIV можно отнести неидеальность трассирующих частиц (размер, плотность), приводящую к тому, что трассеры не всегда точно следуют за потоком. Кроме того, диаметр используемых частиц ограничивает размер элементарной области снизу, использование более мелких частиц сопряжено с влиянием броуновского движения на их смещение, а также накладывает ограничения на мощность источника излучения и чувствительность регистрирующей аппаратуры.

Процесс калибровки всей системы довольно трудоёмкий, и если в ходе эксперимента происходит смещение исследуемого объекта хотя бы на несколько миллиметров, то возникает большая погрешность полученных данных.

Сама по себе PIV-система довольно универсальна. Наличие лазера, оптической системы, скоростной фотокамеры и блока управления позволяет изучать, например, обтекание различных тел. При исследовании более сложных устройств, таких как камеры сгорания, могут возникнуть трудности, например, с созданием специальной оптической системы. Последняя создаётся путём внесения изменений в конструкцию самой камеры. Обработка данных эксперимента производится автоматически в соответствии с выбранным алгоритмом.

Одним из основных элементов данной системы является программа автоматической обработки полученных данных. Самым распространённым является кросскорреляционный алгоритм (рис.2) для определения смещения частиц.

Кратко сущность кросскорреляционного подхода заключается в следующем. Имеются два изображения, на одном из которых зафиксированы частицы в момент первой вспышки, а на другом - в момент второй вспышки лазера. Каждое изображение разбивается на элементарные области (расчётные области).

Фиксируя интенсивность отражённого от частиц и зарегистрированного камерой света функцией двух переменных для первого и второго кадра соответственно, рассчитывается корреляционная функция.

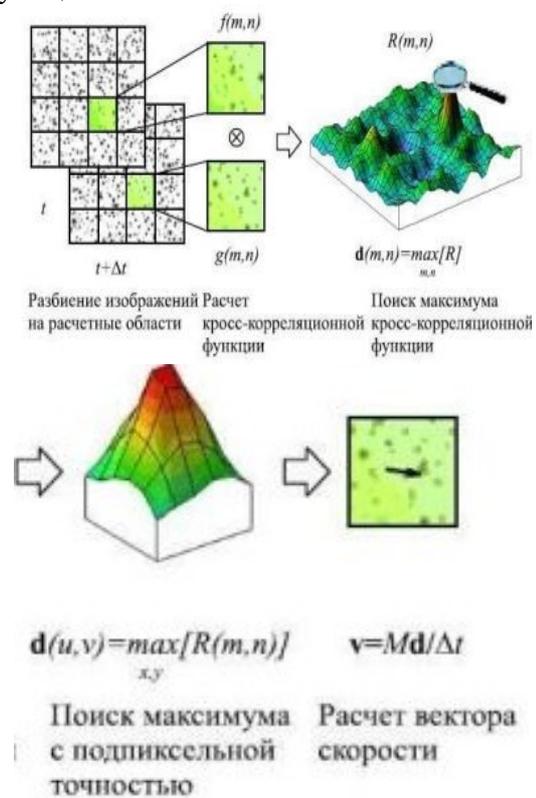


Рис. 2. Кросскорреляционный алгоритм

Максимум корреляционной функции соответствует наиболее вероятному сдвигу частиц в данной области. При этом в идеальном случае предполагается, что скорость потока в элементарной области неизменна и все частицы делают одинаковое перемещение, т.е. у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне шума. Для более точного определения координат максимума используется подпиксельная интерполяция корреляционной функции в

окрестности её максимума. Далее, зная интервал между вспышками, рассчитывается значение скорости.

Экспериментальное исследование проводилось на цилиндрической вихревой камере с конфузурным соплом. Рабочим телом являлся сжатый воздух со следующими параметрами на входе: скоростью $V=40$ м/с, расходом $Q=4320$ л/мин. В качестве трассеров использовались распылённые капли оливкового масла диаметром около 0,5-4 мкм.

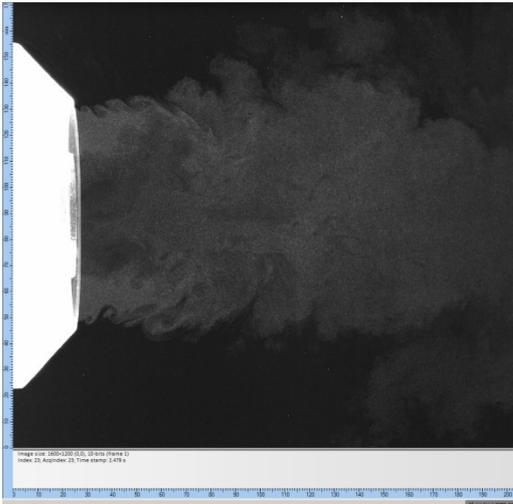


Рис. 3. Фото закрученной струи до обработки в программном комплексе «Dantec DynamicStudio» ($Re=128000$, $V=40$ м/с)

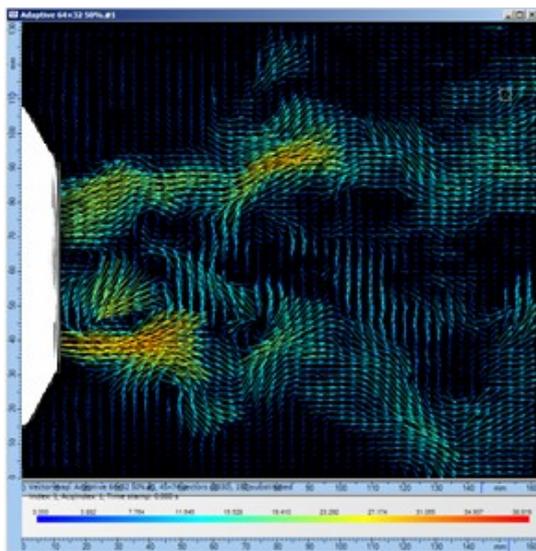


Рис. 4. Векторное поле осевой составляющей (мгновенной) скорости в свободной закрученной струе ($Re=128000$, $V=40$ м/с)

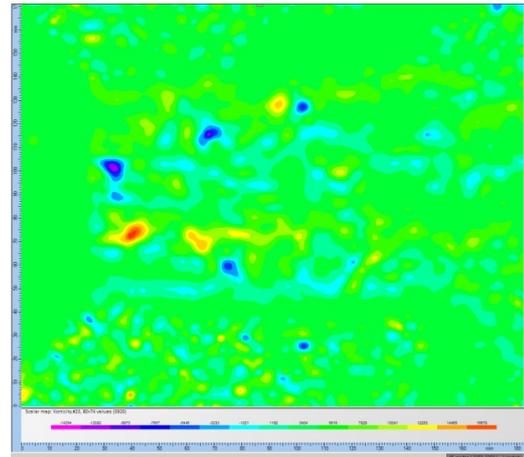


Рис. 5. Распределение завихренностей в свободной закрученной струе ($Re=128000$, $V=40$ м/с)

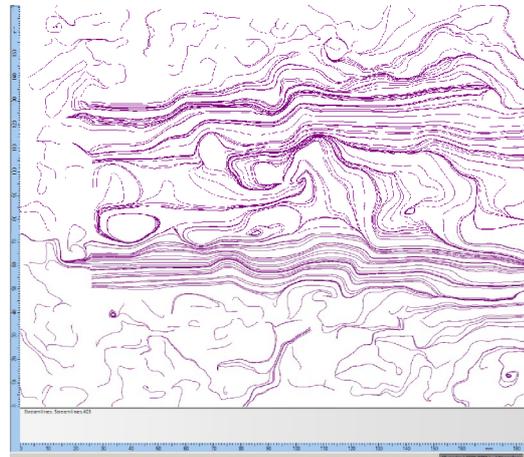


Рис. 6. Распределение линий тока в свободной закрученной струе ($Re=128000$, $V=40$ м/с)

Исследованная вихревая камера имела степень закрутки около 1,0 и относительную длину, измеренную от лопаток завихрителя до среза сопла, равную 1,3 диаметра сопла. При таких соотношениях геометрических размеров поток считается «слабо закрученным» и имеет малый угол раскрытия струи. Считалось маловероятным образование в таких струях явления прецессии вихревого ядра, т. е. явно выраженных крупновихревых структур.

Применяемые ранее [1] акустические и термоанемометрические средства диагностики не позволяли выявлять зарождающиеся крупные вихри в слабо закрученных струях. Более тонкие методы PIV-диагностики показали, что даже при слабой закрутке начинают формироваться

крупные вихри, ассиметрично расположенные вдоль оси струи (рис.3, 4). Представленный на рис.4 фрагмент векторного поля показывает начальную стадию формирования явления прецессии вихревого ядра. На рис.5 представлено распределение завихренностей на начальном участке закрученной струи. Такая форма обработки данных эксперимента позволяет выявить закономерности формирования и движения локальных крупновихревых структур в потоке газа.

Огромным преимуществом PIV-диагностики является возможность быстрого построения полей линий тока (рис.6), профилей составляющих скорости в заданных сечениях (рис.7, 8), а также параметров пульсаций скорости (рис.9, 10).

Перечисленные графики наглядно демонстрируют широкие возможности экспериментального метода определения частоты и амплитуды пульсаций осевых и радиальных компонент скорости (рис.9, 10); распределения по радиусу осреднённого значения осевой компоненты скорости. График на рис.8 наглядно демонстрирует наличие приосевой зоны обратных токов в области расположения вихревого ядра.

Изложенные графические материалы носят чисто иллюстративный характер, демонстрирующий возможности метода. Принципиальное их значение состоит в том, что они могут послужить экспериментальным критерием адекватности численных моделей.

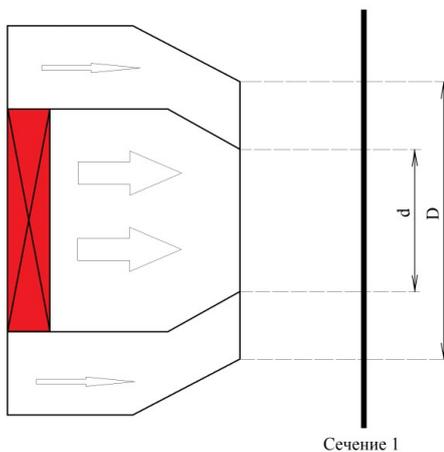


Рис. 7. Схема сечений для построения профилей скоростей

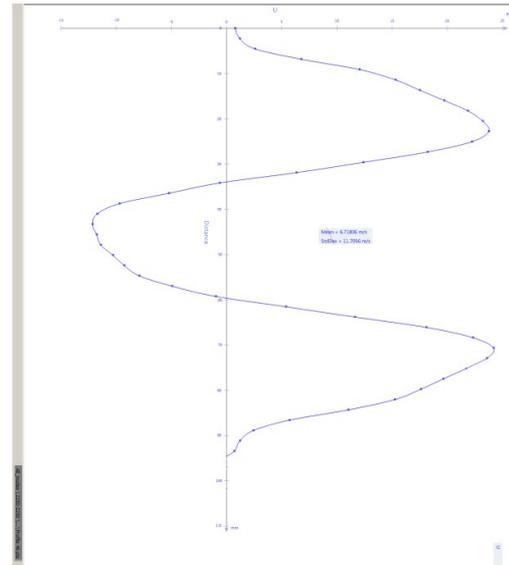


Рис. 8. Профиль осевой скорости (сечение I, скорость от расстояния)

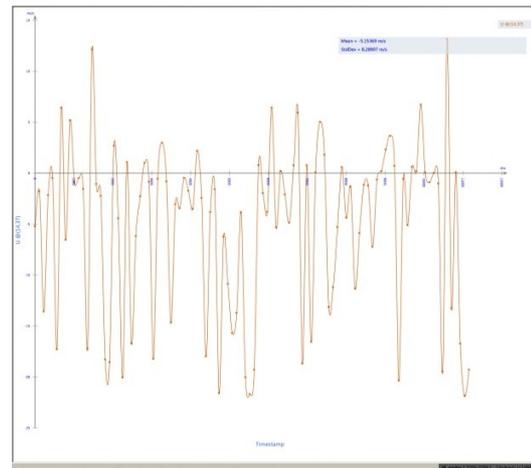


Рис. 9. Профиль осевой скорости (сечение I, скорость от времени)

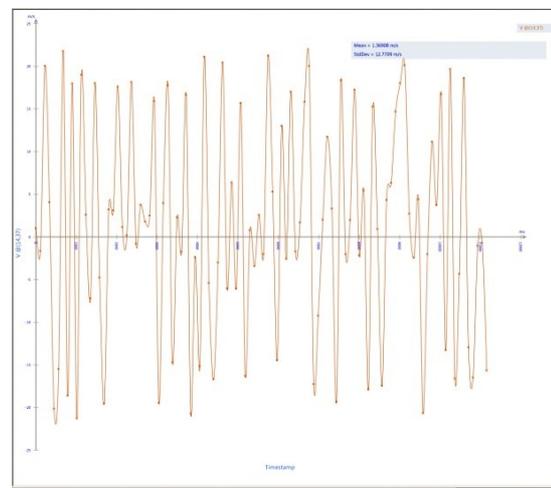


Рис. 10. Профиль радиальной скорости (сечение I, скорость от времени)

Библиографический список

1. Кныш, Ю. А. Автоколебания в закрученных струях [Текст] /Ю.А. Кныш - Самара: Самарский научный центр РАН, 2006. -248 с.

2. Крупномасштабные структуры в двухфазных потоках [Текст]/С. В. Алексеевко, А. В. Бильский, В. Н. Васечкин

[и др.] - Новосибирск: Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, 2008. -8 с.

3. Дулин, В.М. Экспериментальное исследование турбулентной структуры изотермических и реагирующих струйных течений при вариации граничных условий [Текст]: дис....канд. техн. наук: защищена 6.05.2009 / В.М. Дулин. - Новосибирск.

EXPERIMENTAL STUDY OF SWIRLED GAS FLOW BY THE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY METHOD

© 2011 U. A. Knysh, Ye. S. Redkin, D. N. Dmitriev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

Turbulent jet flows have a wide range of application: rocket and turbine engines, combustion chambers, cooling systems, etc. Hence there is great scope for their study. Knowledge in this area and investigating the possibilities of controlling the intensity of vortices can be used for flame stabilization, as well as increasing the efficiency of heat and mass exchange in various devices. In this paper we obtain a more detailed picture of the formation of local vortices.

PIV (Particle Image Velocimetry), visualization of tracer flow, jet, swirled gas flow, vector field, streamlines.

Информация об авторах

Кныш Юрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: knysh194@mail.ru. Область научных интересов: газодинамика и горение в закрученных потоках.

Редькин Егор Сергеевич, студент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: аэродинамика и теплообмен в закрученных струях.

Дмитриев Дмитрий Николаевич, инженер Научного образовательного центра газодинамических исследований, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: экспериментальное исследование аэродинамических процессов в камерах сгорания ГТД.

Knysh Yuri Alekseevich, Doctor of Technical Science, professor of the department of theory of aircraft engines, Samara State Aerospace University. E-Mail: Knysh194@mail.ru. Area of research: gas dynamics and combustion in swirled flows.

Redkin Yegor Sergeevich, student of the department of thermal and heat engines, Samara State Aerospace University. Area of research: gas dynamics and combustion in swirled flows.

Dmitriev Dmitriy Nikolaevich, engineer, scientific and educational center of gas dynamic research, Samara State Aerospace University. Area of research: experimental research of aerodynamic processes in combustion chambers of gas turbine engines.