

ЛАБОРАТОРНЫЕ ТЕСТЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ АКСИАЛЬНО СИММЕТРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Маракасов Д.А., Сухарев А.А., Шерстобитов М.В., Шестернин А.Н.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

e-mail: mda@iao.ru, sukharev@iao.ru, shmike@iao.ru, san@iao.ru

В работе выполнено тестирование макета устройства для изучения пространственной структуры аксиально симметричных течений. В качестве объекта исследований был выбран модельный огненный смерч (МОС). По результатам исследований восстановлены средняя плотность и температура в МОС. Проведено сопоставление поля средней температуры в МОС с данными контактных измерений.

Для тестирования устройства, предназначенного для изучения пространственной структуры сверхзвуковых течений, был выбран модельный огненный смерч (МОС). Стенд для исследований включает макет устройства для изучения пространственной структуры сверхзвуковых течений, блок формирования МОС, устройство измерения скорости вращения двигателя. Блок формирования макета обеспечивал создание 15 горизонтально разнесенных диафрагмированных пучков с веерно расходящимися осями. Прошедшее через исследуемый поток излучение направляется на рассеивающий экран и регистрируется видеокамерой. Частота регистрации в данном варианте ограничена возможностями видеокамеры (~1 кГц), но снимается ограничение на число одновременно отслеживаемых пучков. Это позволяет с достаточным пространственным разрешением построить матрицу осредненных отклонений пучков в исследуемом сечении потока за один запуск, что выгодно отличает эту версию Макета от раннего варианта, описанного в [1].

Для решения задачи визуализации полей средней плотности воздуха и пульсационных характеристик в аксиально-симметричном потоке были разработаны и программно реализованы алгоритмы обработки видеозаписей, снимаемых с выхода Блока регистрации лабораторного макета. Для каждого из 15 пучков вычислялись координаты энергетических центров тяжести (ЭЦТ). Осредненные смещения координат после выхода исследуемого течения на стационарный режим по отношению к положениям ЭЦТ до запуска пересчитываются в угловые отклонения пучков как функции их прицельных параметров, определяемых положением соответствующей диафрагмы. Совокупность таких зависимостей, полученных в разных сечениях потока, формируют образа течения, содержащий достаточно информации для восстановления пространственного распределения средней плотности воздуха.

Реализация алгоритмов выполнена в виде комплекса программ в среде LabView 10.

Объектом исследования был МОС на основе закрученного столба пламени изопропилового спирта ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$). Диаметр емкости с горючим составлял 14 см,

закрутка внешнего относительно емкости с горючим воздушного потока осуществляется лопастями снизу. Частота закрутки варьировалась от 5 до 17 об/с. В результате измерений в диапазоне высот 5-40 см были построены образы столба пламени МОС для различных значений частоты закрутки, которые служили основой для восстановления полей средней плотности и температуры в МОС. При тех же условиях в нескольких сечениях МОС проводились измерения температуры контактными датчиками (термопарами).

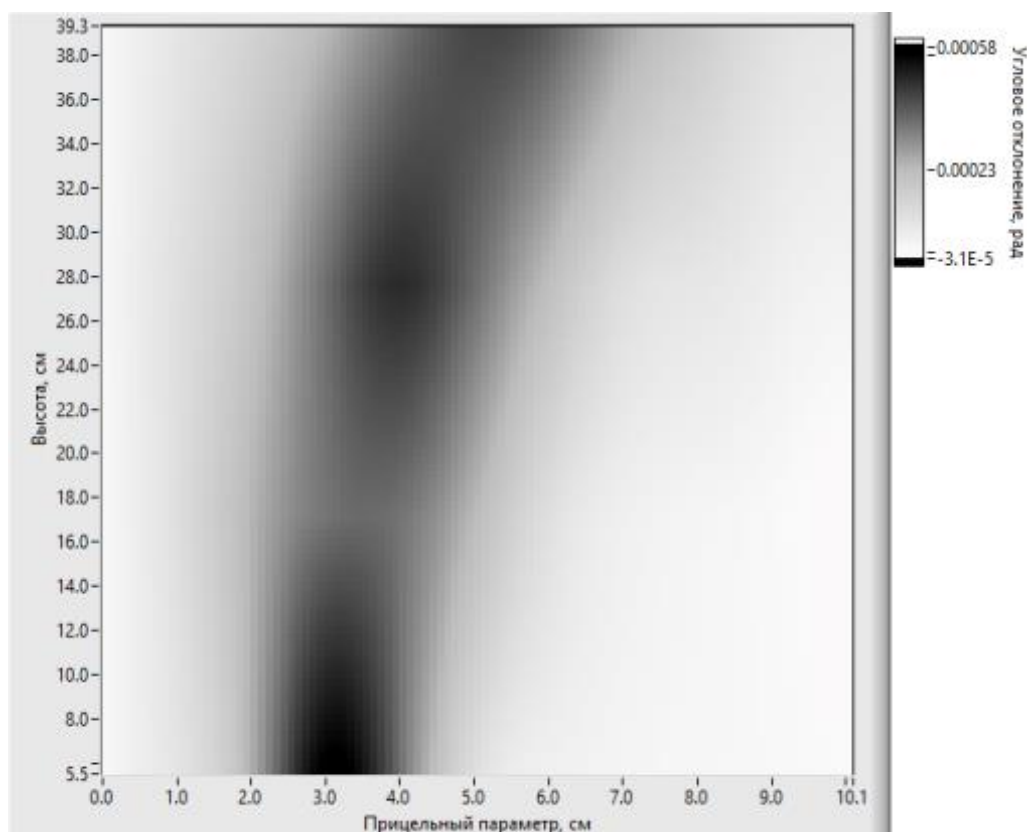


Рисунок – 1. Пример образа МОС (частота закрутки – 13 об/с).

Пример образа МОС при частоте закрутки 13 об./с представлен на Рис. 1. Можно выделить начальный участок (до высоты ~18 см) с практически не зависящим от высоты профилем угловых отклонений, где столб МОС ограничен внешней стенкой на расстоянии 3-3.5 см от оси. Разрушение структуры МОС начинается с высот ~20 см и проявляется в уширении стенки МОС и ее удалении от оси.

По результатам просвечивания восстановлены средняя плотность и температура в пламени. Профили средней плотности показывают наличие подъема в приосевой области в начальном участке (непосредственно над емкостью с горючим) и постепенное смыкание областей пониженной плотности, находящихся по разные стороны от оси МОС, на высотах 20-

30 см, после чего эффекты, связанные с закрученностью, перестают ощутимо влиять на структуру пламени (Рис. 2).

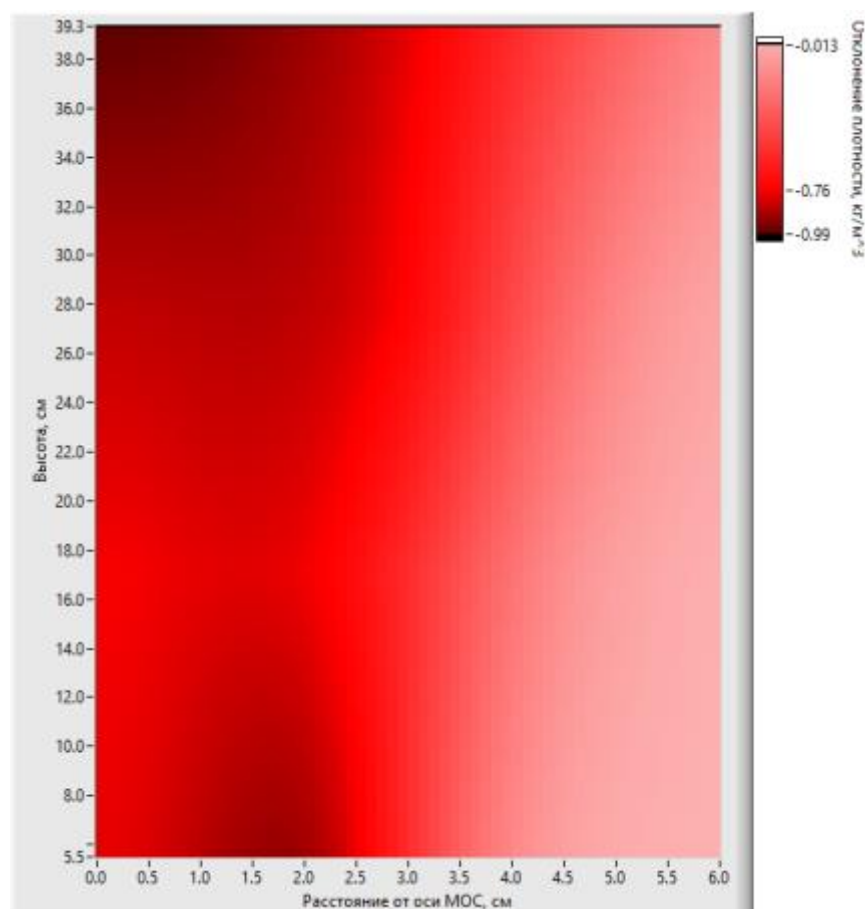


Рисунок – 2. Отклонение плотности в столбе МОС от плотности невозмущенной атмосферы (частота закрутки – 7 об/с)

Полученные результаты демонстрируют возможность дистанционного определения положения и размеров ядра МОС.

Для сопоставления результатов восстановления был выполнен расчет поля средней температуры в МОС с использованием модели Кауфмана-Скалли [2, 3] для распределения скорости в пламени и в предположении о незначительности изменений постоянной Гладстона-Дейла [4] за счет неоднородности химического состава газа в МОС. Сопоставление полученных радиальных зависимостей с данными контактных измерений показывают неплохое соответствие (Рис. 3) как по величине эффективного радиуса МОС, так и по характерному провалу температурного профиля вблизи оси.

Некоторые количественные расхождения (в пределах 10%), по-видимому, являются следствием нарушения структуры МОС за счет крепежа датчиков и не выполнения принятых допущений о распределении скорости в МОС.

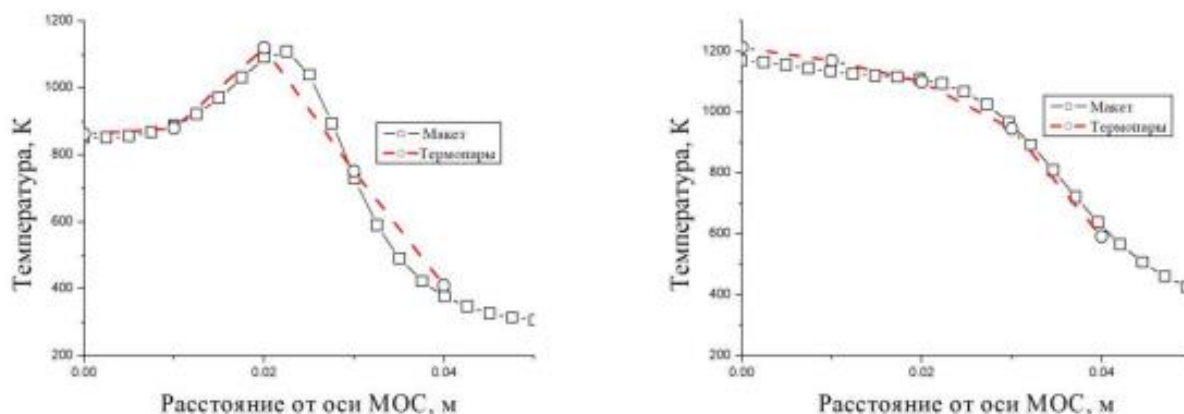


Рисунок – 3. Примеры сопоставления оценок температуры МОС на высотах 5.5 см (слева) и 28 см (справа) (частота закрутки – 13 об/с).

Заключение

Представленные результаты тестирования устройства для изучения пространственной структуры высокоскоростных течений, на примере закрученного течения в пламени МОС, показали, что при достигнутом разрешении по прицельному параметру 0.5 мм при радиусе диафрагмированного пучка в исследуемом сечении 0.1 мм возможно восстанавливать среднюю плотность и температуру в пламени МОС. Погрешность оценки температуры в пламени МОС не превосходит 10%.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Маракасов Д. А., Банах В. А., Сухарев А. А. Восстановление пространственного распределения средней плотности воздуха в сверхзвуковой струе на основе результатов лазерного просвечивания. // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 02. С. 101–106. DOI: 10.15372/AOO20210204.
2. Kaufmann, W. Über die Ausbreitung kreiszylindrischer Wirbel in zähen (viskosen) Flüssigkeiten // Ingenieur-archiv 1962. V.31, P.1-9.
3. Murakhtina, T., Okulov, V. Changes in topology and symmetry of vorticity field during the turbulent vortex breakdown // Technical Physics Letters 2000. V.26, P.432–435.
4. Gladstone J.H., Dale T.P. Researches on the refraction, dispersion, and sensitiveness of liquids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1863. V.153. P. 317–343.