



УДК 53.087.47

В.П. Маслов<sup>1</sup>, Б.И. Минеев<sup>1</sup>, А.К. Миронов<sup>1</sup>, Д.Л. Захаров<sup>1</sup>,  
Е.Ю. Степанов<sup>2</sup>, О.А. Евтихьева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральный институт авиационного моторостроения, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский энергетический институт (технический университет), Россия

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА НА БАЗЕ АППАРАТУРЫ PIV

*Работа посвящена разработке методики измерения полей концентрации газообразного топлива за фронтным модулем камеры сгорания перспективной ГТУ при использовании различных вариантов топливных форсунок. Эта оригинальная методика, основанная на использовании аппаратуры PIV (Particle Image Velocimeter), позволяет без существенного изменения схемы установки проводить измерения как полей скорости трехмерного высокотурбулентного потока, так и полей концентрации имитатора топлива.*

*Эта методика аналогична известному методу ЛОМ (локальный оптический метод) для измерения концентрации пассивной примеси. Основное отличие состоит в том, что ЛОМ является локальным методом, т.е. регистрируется концентрация в малом измерительном объеме порядка  $0,2 \text{ мм}^3$ , а новая методика позволяет измерять поля мгновенных и осредненных скоростей и концентраций, что дает исчерпывающую информацию о структуре течения.*

### ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ, МЕТОДИКА, ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД

**1. ВВЕДЕНИЕ.** Экспериментальные данные о полях скоростей и концентраций дают исчерпывающую информацию о структуре течения и процессе смешения в сложных высокотурбулентных закрученных потоках, характерных для фронтных устройств камер сгорания. Эта информация также необходима для верификации вновь разрабатываемых методов расчета сильно закрученных течений. Измерения полей трех компонент скорости в струе за фронтным модулем камеры сгорания перспективной ГТУ с различными типами форсунок в составе фронтного модуля были проведены ранее с помощью метода Particle Image Velocimetry (PIV). Для получения информации о распределении газообразного топлива в струе за фронтным модулем представлялось заманчивым также использовать аппаратуру и программное обеспечение PIV. Чтобы решить эту задачу, авторами была разработана методика измерения полей концентрации, основанная на использовании основных элементов системы PIV, которая не потребовала существенных измене-

ний схемы установки. Была несколько изменена схема запыления потока и отработаны методические приемы по обработке и коррекции кадров изображений.

**2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ.** В продольном сечении, проходящем через ось струи, формировался лазерный нож. Имитатором топлива являлся воздух, поступавший в топливную магистраль, с засеиваемыми в него мелкими (1 мкм) монодисперсными частицами примеси (масляным аэрозолем), поступающими от штатного PIV генератора частиц. Воздух, вытекающий через фронтное устройство, оставался чистым. При определенной, достаточно высокой концентрации частиц примеси ( $c^* > 10^6$  частиц/см<sup>3</sup>) интенсивность рассеянного частицами света пропорциональна их концентрации [1, 2], т.е. концентрации имитатора топлива. Этот метод аналогичен известному методу ЛОМ (локальный оптический метод) [1, 2] для измерения концентрации пассивной примеси. Основное отличие состоит в том, что с помощью ЛОМ измеряется излучение, рассеянное частицами в измерительном объеме с характерным размером  $0,5 \times 0,5 \times 1$  мм, а в данном методе регистрируется мгновенное поле концентрации.

В экспериментах регистрировались серии из 100 мгновенных кадров визуализации потока, затем с помощью программы обработки изображений эти кадры усреднялись. По распределению яркости на осредненном изображении оценивалось поле концентрации имитатора топлива.

Так как интенсивность света рассеянного частицами аэрозоля пропорциональна не только концентрации частиц, но и интенсивности падающего излучения, то при измерении полей концентрации необходимо учитывать неравномерность распределения интенсивности лазерного излучения в поперечном сечении лазерного ножа. Кроме того, для расчета концентрации по кадрам визуализации необходимо знать значения яркости изображений при концентрации топлива, равной единице ( $C = 1$ ). Для решения этих проблем вместо завихрителя на координатное устройство устанавливалось профилированное сопло с большим поджатием. К этому соплу подсоединялся выход топливной магистрали и устройство регулировки, позволяющее добиться концентрации аэрозоля в имитаторе топлива такой же, как при испытаниях различных типов форсунок.

Известно, что в пределах начального участка такой струи концентрация примеси не должна изменяться, поэтому по распределению яркости изображения вдоль оси струи в пределах начального участка можно определить распределение интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного ножа. Значения яркости зарегистрированных изображений вблизи среза сопла использовались для определения интенсивности излучения при начальной концентрации топлива ( $C = 1$ ). На рис.1 показано поле концентрации пассивной примеси в струе за профилированным соплом.

Распределение яркости излучения вдоль начального участка струи из профилированного сопла аппроксимировалось функцией  $I_0(X)$  (полином 9 степени), которая использовалась для пересчета яркости на кадрах изображений струи за фронтальным устройством.

Отметим, что из-за недостаточного динамического диапазона видеокамеры регистрация струи из профилированного сопла и струи за фронтальным устройством производилась при различных значениях относительного отверстия приемного объектива  $D/f$ . Это обстоятельство также учитывалось при обработке кадров изображений. На рис.2 показано поле концентрации за фронтальным устройством для одного из режимов работы форсунки.

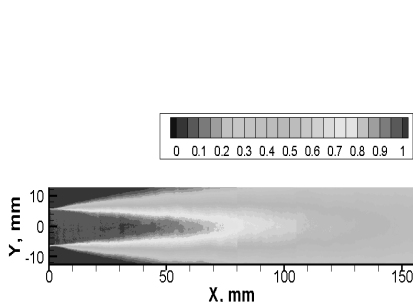


Рис.1. Поле концентрации пассивной примеси в струе за профилированным соплом

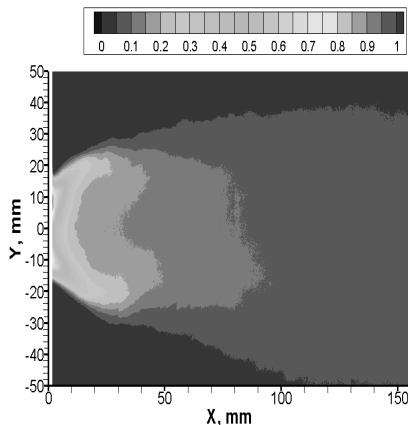


Рис.2. Поле концентрации пассивной примеси в струе за фронтальным устройством

Для проверки работоспособности методики измерения полей средней концентрации было проведено сравнение среднemasсовой концентрации топлива, измеренной с помощью расходомеров  $\langle C \rangle = G_{int} / (G_{int} + G_{ext})$ , где  $G_{int}$  – расход топлива,  $G_{int} + G_{ext}$  – суммарный расход, с концентрацией, рассчитанной по результатам измерений, полученных с помощью разработанной методики. Значение  $\langle C \rangle$  рассчитывалось по результатам измерений по формуле

$$\langle C \rangle = \frac{\int_{-y}^y \pi U(y) \langle C \rangle (y) y dy}{\int_{-y}^y \pi U(y) y dy}$$

Измерения полей скорости  $U$  были выполнены ранее при таких же режимах работы фронтального устройства. Результаты сравнения представлены в таблице 1.

Таблица 1

| № режима | $\langle C \rangle$ , вычисленная по показаниям расходомеров (%) | $\langle C \rangle$ , рассчитанная по измерениям профилей скорости и концентрации (%) |
|----------|--|---|
| 1        | 8,7  | 8,8   |
| 2        | 12   | 11,7  |

**3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Предложенная методика была успешно применена при исследованиях течений за фронтowymi устройствами камер сгорания с различными форсунками в составе фронтowych устройств.

#### 4. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербина Ю.А., Безуглов В.А. Оптический метод измерения характеристик турбулентных пульсаций концентрации пассивной примеси // Труды ЦАГИ. В. 1477. М., 1973.

2. Щербина Ю.А., Минеев Б.И. Изучение турбулентной диффузии осесимметричной струи в спутном сверхзвуковом потоке с помощью локального оптического метода измерения концентрации. Депонировано ВИНТИ. М., N 4505-81 Деп., 1981.

*V.P. Maslov<sup>1</sup>, B.I. Mineev<sup>1</sup>, A.K. Mironov<sup>1</sup>, D.L. Zakharov<sup>1</sup>,  
E.Yu. Stepanov<sup>2</sup>, O.A. Evstihieva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>The Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia

### DEVELOPMENT OF A MEASUREMENT TECHNIQUE OF GASEOUS FUEL CONCENTRATION FIELDS BY PIV TECHNIQUE

*This work is devoted to development of a measurement technique of gaseous fuel concentration fields after the burner of the combustion chamber with use of different fuel injectors. This original technique is based on PIV technique (Particle Image Velocimeter) It allows to measure both velocity fields of high-turbulent stream, and concentration fields of gas fuel imitator with the same hardware and software.*

*This technique is similar to known method LOM (Local Optical Method) used to measure the concentration of monodisperse aerosol. LOM is a local method, i.e. it measure concentration in a small measuring volume known around  $0,2 \text{ mm}^3$ . The new technique allows to measure both instant and averaged fields of velocity and concentration, and it gives the comprehensive data on current structure of a flow.*

CONCENTRATION MEASUREMENT, TECHNIQUE, OPTICAL METHOD