УДК 533.17

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ ПРИМЕСИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ

Кравцов З.Д., Дулин В.М., Лобасов А.С., Шараборин Д.К.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН,
Новосибирский государственный университет,
Россия, Новосибирск

Данная работа выполнена при финансировании Российским Научным Фондом (грант 14-19-01685 под руководством проф. Д.М.Марковича)

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы являлось получение новых экспериментальных данных по распространению пассивной примеси в ближней области осесимметричной затопленной турбулентной струи. Для проведения измерений был применен современный бесконтактный метод, основанный на плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ). В качестве объекта измерения была выбрана осесимметричная затопленная турбулентная струя, так как она является хорошо изученным течением, удобным для сравнения с результатами численного моделирования. В качестве примеси использовались пары ацетона, концентрация которых в поступающей из сопла струе поддерживалась постоянной. Для регистрации локального сигнала флуоресценции паров при смешении струи с внешним воздухом использовалась цифровая камера с электронно-оптическим преобразователем, кварцевым объективом и оптическим фильтром. Для возбуждения флуоресценции паров ацетона использовался перестраиваемый лазер на красителях с длиной волны излучения 283 нм. Лазерный луч разворачивался в коллимированный световой нож, проходящий через ось струи.

В ходе работы получены мгновенные распределения концентрации в центральной плоскости турбулентной круглой струи воздуха с примесью ацетона и объемная концентрация паров ацетона в ядре струи. Исследован характер изменения интенсивности пульсаций концентрации в слое смешения струи в зависимости от числа Рейнольдса. Результаты работы являются полезными для верификации моделей турбулентного переноса в сдвиговых течениях.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптические методы исследования, например плоскостной ЛИФ, получили широкое распространение благодаря высокому пространственному и временному разрешениям и не высокому влиянию на поток. Информация о распределении концентрации вещества в потоке даст возможность сделать выводы о массопереносе и степени перемешивания вещества. Измерения поля температуры и концентрации с высокой точностью необходимы как для проведения фундаментальных исследований с целью валидации теоретических и численных моделей, так и для решения прикладных задач диагностики различных процессов.

В большинстве работ основными характеристиками для исследования являются пульсационные характеристики струи (скорость, кинетическая энергия турбулентности, и т.п.), время от времени рассматривались вопросы связанные с процессами перемешивания и переноса пассивной примеси в потоке, но, как правило, затрагивались они как второстепенный вопрос. Существует не так много экспериментальных работ по изучению процессов массопереноса в турбулентных течениях. Например, в работе [1] были получены результаты для осесимметричной круглой струи, в которых измерены радиальные и осевые флуктуации скорости, концентрации. В работе [2] объектом исследования была дальняя область круглой турбулентной затопленной струи воды. Для получения данных была использована комбинация двух бесконтактных методов – метода ЛИФ и цифрового метода отслеживания скорости частиц (PIV). Вода с красителем, в качестве которого был выбран родамин, истекала через сопло диаметром 3,14мм в большой бак с водой. Число Рейнольдса для потока было 3000. В результате данных исследований были получены: поле средних скоростей, поле средней концентрации, напряжение Рейнольдса, дисперсия концентрации.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

В случае измерений методом ЛИФ вторая (532 нм) гармоника импульсного твердотельного Nd:YAG лазера (5) (Quanta-Ray, 10Гц, 1Дж) с помощью системы призм (9) использовалась для накачки перестраиваемого лазера на красителях (6) (Sirah), в качестве красителя использовался Rhodamine 6G. Небольшая часть лазерного излучения направлялась в измеритель мощности (7). Измерение энергии каждого импульса лазерного излучения необходимо для корректного сравнения друг с другом мгновенных изображений флуоресценции. Энергия лазерного излучения в диапазоне длин волн 283-284 нм составляла 10 мДж. Лазерный луч разворачивался в коллимированный нож (8) размером 50 мм в вертикальном направлении и толщиной менее 0,8 мм. Нож проходил через вертикальную ось симметрии трубы (2), возбуждая флуоресценцию молекул ацетона, сигнал которой регистрировался на камеру (10).

Для регистрации сигнала ЛИФ паров ацетона использовался электронно-оптический преобразователь с мультиканальным усилителем (11) (LaVision IRO) с фотокатодом S20 (multialkali), имеющим квантовую эффективность порядка 25% в исследуемом диапазоне длин волн (280-360 нм). После усиления фосфорное покрытие преобразователя освещало гибридную ПЗС-КМОП матрицу (sCMOS) 16-битной камеры (разрешение: 2560×2160 пикселей, размер пикселя: 6.5×6.5 мкм). На фотокатод электронно-оптического преобразователя сигнал ЛИФ фокусировался кварцевым объективом (LaVision UV-lens, f#2.8, 100 мм) с установленным на нём оптическим полосно-пропускающим фильтром (300-380 нм). Применение оптического фильтра позволяет избавиться от нежелательного фона вследствие рассеяния лазерного излучения, а так же переотражений от сопла.

Для создания турбулентной осесимметричной струи использовалась гладкая труба с геометрическими размерами: длинна L=700 мм внутренний диаметр D=21 мм (рисунок 1).

Для создания потока с пассивной примесью использовался ацетоновый питатель (1). Внутри емкости с водой размещена емкость с ацетоном, над дном которой установлена пластина с множеством отверстий. Воздух, подающийся в питатель, проходит по трубке на дно емкости с ацетоном и пропускается через жидкую фазу ацетона. Температура паров ацетона измерялась с помощью термопары и составляла около 42ºС. В емкости с водой с помощью термостата (15) поддерживалась постоянная температура ≈ 82 ºС.

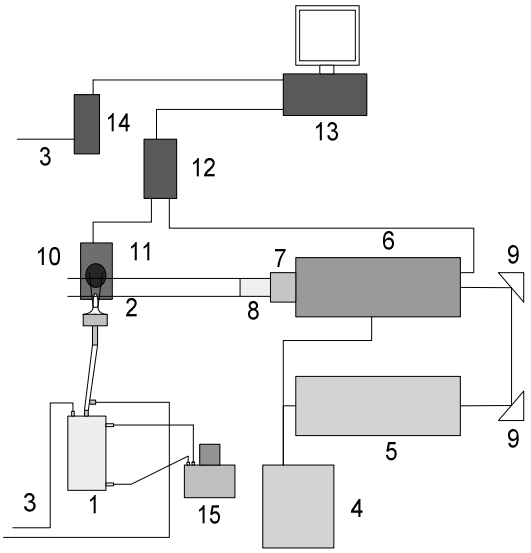

Рис. 1 Схема измерительной системы.

Воздух поступал по воздушной магистрали (3) и его расход регулировался с помощью расходомера (14). Вся установка автоматизирована и управляется с помощью ПК (13) через синхронизатор (12).

ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННОГО СИГНАЛА

Сигнал, полученный из ЛИФ измерений, зависит от количества пришедших на матрицу камеры фотоэлектронов, число которых зависит от различных факторов: чувствительности системы регистрации, распределения интенсивности лазерного излучения в пространстве, концентрации флуоресцирующего вещества, квантового выхода. Лазерный нож освещает исследуемый объем, молекулы ацетона поглощают фотоны лазерного излучения, переходят в возбужденное состояние и спонтанно излучают фотоны, в том числе в направлении системы регистрации сигнала. Часть этих фотонов создаст фотоэлектроны, которые преобразуются в сигнал на матрице камеры.

Для коррекции фонового сигнала производились измерения изображений без потока, но с работающим лазером. Полученные изображения усреднялись по 200 кадрам.

Коррекция, связанная с чувствительностью матрицы камеры, проводилась с помощью изображения белого листа бумаги, который максимально равномерно подсвечивался источником света. Из полученных результатов можно сделать вывод, что чувствительность матрицы камеры не равномерна, а имеет более чувствительную область, что учитывалось при обработке сигнала.

Распределение энергии в ноже не является равномерным. Для учета этого влияния при обработке данных было получено изображение распределения интенсивности вдоль ножа, представленное на рисунке 2. Для этого проводились измерения в калибро-

вочной кювете, заполненной парами ацетона. Мгновенные изображения лазерного ножа усреднялись по 200 кадрам, для каждого из которых предварительно вычитался фон, применялась коррекция чувствительности матицы и учитывалась вариация энергии.

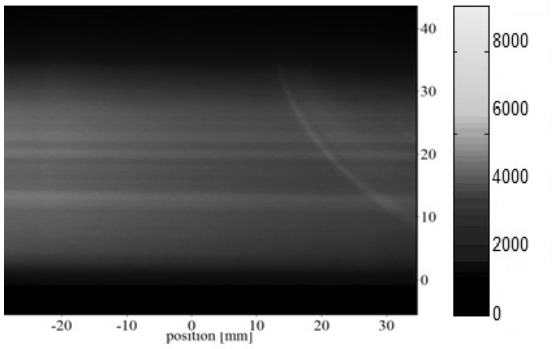

Рис. 2 Распределение интенсивности в лазерном ноже.

Проходя сквозь поток, лазерное излучение поглощается парами ацетона, поэтому интенсивность сигнала уменьшается вдоль направления распространения лазерного ножа в области измерений. На полученных изображениях нарушена симметричность распределения интенсивности. Для снижения влияния этого эффекта проводилась коррекция поглощения. Так как распределение примеси в калибровочной кювете можно считать равномерным, то из-за поглощения ацетоном интенсивность излучения спадает линейно в первом приближении. Предполагая, что зависимость уменьшения сигнала от пройденного расстояния в потоке является линейной, был получен коэффициент поглощения. На рисунке (3) представлен средний профиль интенсивности вдоль лазерного ножа для калибровочной кюветы до обработки и после.

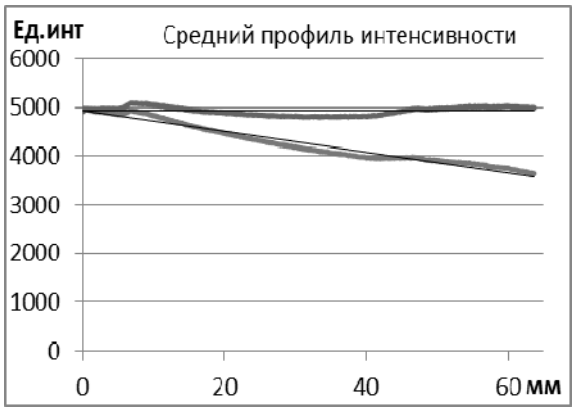

Рис. 3 Средний профиль интенсивности в кювете.

С помощью пакета программ MATLAB проводилась коррекция поглощения для каждого мгновенного изображения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как известно, интенсивность сигнала флуоресценции зависит от концентрации. Количество фотоэлектронов пропорционально количеству фотонов лазера и концентрации флуоресцирующего вещества. Это позволяет рассчитать объемную концентрацию флуоресцентной примеси в струе.

В ходе проведенных экспериментов были получены изображения интенсивности для мгновенных распределений примеси паров ацетона в воздухе. Предполагая, что в калибровочной кювете равномерное распределение паров ацетона, значения единиц интенсивности можно перевести в значения объемной концентрации.

В кювету с помощью пипетки помещалось 0,036 г ацетона. Масса была измерена с помощью весов с точностью до 0,001 г. Объем кюветы - 283 см^3. Кювета герметично закрывалась и, после того как весь ацетон испарялся, проводились измерения. Получившемуся среднему значению интенсивности соответствовала концентрация, которую можно рассчитать, зная, что масса жидкой фазы ацетона 36×10^{-3} г. Плотность жидкой фазы ацетона 780 кг/м^3, плотность паров ацетона (при температуре 300 К) составляет 2,05кг/м^3 – справочное значение. Тогда объемная средняя концентрация паров ацетона в кювете:

$$n_{ij} = \frac{V_{ж} \rho_{ж}}{V} \frac{\rho_{п}}{}$$

Откуда, зная среднее значение сигнала в кювете, можно найти связь для значений интенсивности сигнала и концентрации: 1ед.инт.= $1{,}2\times10^{-6}$ n_v.

На рисунке 4 представлены усредненные по 500 кадрам изображения распределения концентрации для различных режимов течения с числами Рейнольдса 3000, 6000 и 9000.

На рисунке 5 представлено распределение интенсивности пульсаций концентрации для каждого режима течения на высоте одного калибра, нормированное на среднее значение концентрации в ядре струи.

В области ядра струи интенсивность пульсаций ожидается равной нулю, но в полученных данных она составляет около 7%. Это объясняется погрешностью измерений, в том числе вызванной остаточным шумом камеры, фоном и остаточным эффектом поглощения. С возрастанием числа Рейнольдса среднеквадратичное отклонение концентрации от среднего значения в слое смешения струи уменьшается, что согласуется с данными полученными в работе [1].

На представленных гистограммах ширина слоя смешения уменьшается с возрастанием числа Рейнольдса, что свидетельствует о лучшем перемешивании при большем числе Рейнольдса.

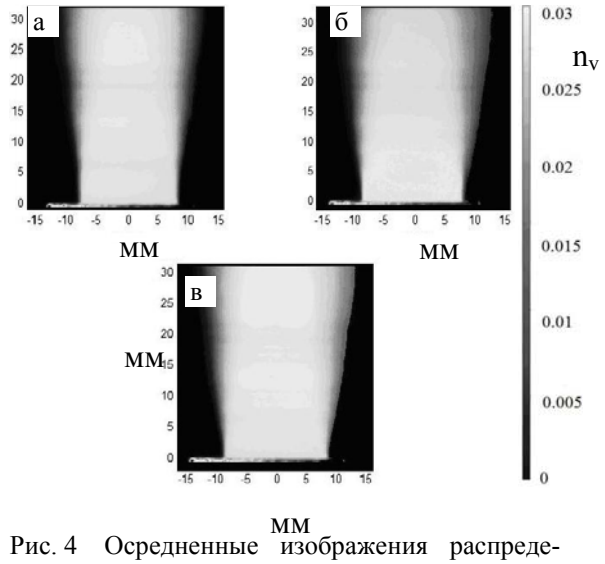

Рис. 4 Осредненные изображения распределения концентрации: а) Re=3000, б) Re= 3000, в) Re=9000.

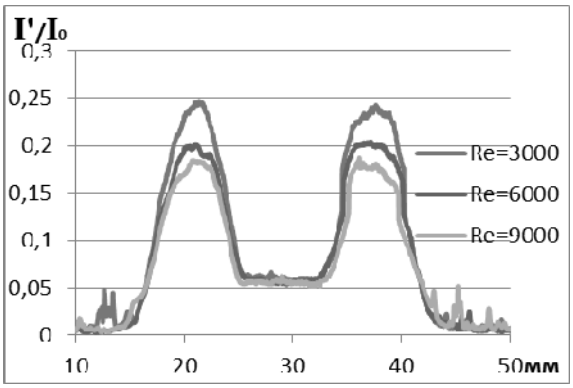

Рис. 5 Распределение интенсивности пульсаций.

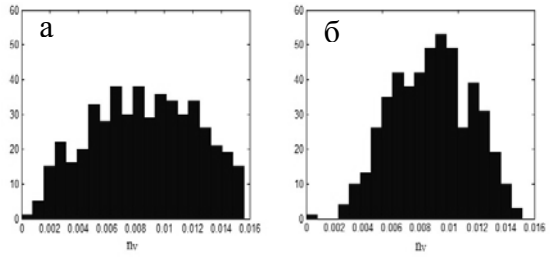

Рис. 6 Гистограмма для области смешения для режимов с числом Рейнольдса: а) 3000, б) 9000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено экспериментальное исследование переноса пассивной примеси в ближней области осесимметричной затопленной струи с числами Рейнольдса от 3000 до 9000. Концентрация пассивной примеси измерялась методом панорамного ЛИФ. Интенсивность регистрируемого сигнала линейно зависит от концентрации флуоресцирующего вещества (ацетона) в потоке (при малых значениях концентрации). Использованы методы коррекции, которые позволяют учесть поглощение в среде с парами ацетона, неравномерность распределения энергии в лазерном ноже, фоновые сигналы, связанные с шумом камеры и переотражениями, неоднородность чувствительности матрицы камеры.

В ходе работы получены мгновенные изображения распределения концентрации в центральной плоскости турбулентной круглой струи воздуха с примесью ацетона, объемная концентрация которого составила 1,5%. Исследован характер изменения интенсивности пульсаций локальной концентрации - она уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. Полученные значения согласуются с данными предыдущих исследований [1] и могут быть использованы для верификации моделей турбулентного переноса в сдвиговых течениях.

В перспективе, при более точном учете эффекта локального поглощения лазерного излучения, данные ЛИФ метода могут быть использованы для анализа градиента и двухточечных корреляций пространственных распределений концентрации в турбулентном потоке.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. A. Zarruk, E. A. Cowen 2007 Simultaneous velocity and passive scalar concentration measurements in low Reynolds number neutrally buoyant turbulent round jets Exp Fluids (2008) 44:865–872.
2. D. R. Webster, P. J. W. Roberts, L. Ra'ad Simultaneous DPTV/PLIF measurements of a turbulent jet. Experiments in Fluids 30 (2001).
3. W.K. Adrian Law Velocity and concentration distributions of round and plane turbulent jets Journal of Engineering Mathematics (2006) 56: 69–7