

УДК 536.461

Л.М. Чикишев^{1,2}, А.С. Лобасов^{1,2}, В.М. Дулин^{1,2}, В.В. Цатиашвили³, В.Г. Августинovich³,
А.В. Бильский^{1,2}, Д.М. Маркович^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет 630090, Россия, Новосибирск

³ ОАО "Авиадвигатель", Россия, Пермь

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ PIV/PLIF ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ЗА ПЕРСПЕКТИВНЫМ ФРОНТОВЫМ УСТРОЙСТВОМ КС ГТУ

АННОТАЦИЯ

В рамках данной работы были проведены одновременные измерения полей скорости и концентрации пассивной примеси при реалистичных значениях расхода в холодной модели камеры сгорания газотурбинного типа. В поток добавлялись пары ацетона для проведения количественных измерений концентрации модельного топлива методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции. Поля скорости измерялись методом PIV. Панорамные оптические методы позволили получить информацию, которая чрезвычайно необходима для верификации численного расчетного кода, и не может быть получена в ходе точечных измерений. Качество экспериментальных данных, а также алгоритмы обработки изображений позволили измерить турбулентный поток пассивной примеси.

ПАНОРАМНАЯ АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ, ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ, ЗАКРУЧЕННОЕ ТЕЧЕНИЕ, ГТУ

ВВЕДЕНИЕ

Перемешивание топлива и окислителя играет важную роль в стабилизации пламени и образовании вредных выбросов. Численные коды, использующиеся для моделирования процессов турбулентного массопереноса в ГТУ требуют верификации за счет использования комплексных экспериментальных данных высокого качества, получение которых часто является весьма непростой задачей. Точечные методы измерений обладают высоким временным разрешением, однако не обеспечивают информации об особенностях пространственной структуры течения и турбулентного переноса. Напротив, панорамные методы, такие как анемометрия по изображениям частиц (PIV) и лазерно-индуцированная флуоресценция (PLIF) имеют преимущество с точки зрения анализа мгновенных распределений поля скорости и концентрации пассивной примеси. Такого рода данные обычно больше подходят для верификации расчетных кодов.

Важным аспектом таких кодов является модель турбулентного переноса пассивной примеси. Лазерно-индуцированная флуоресценция паров ацетона в комбинации с анемометрией по изображениям частиц может быть использована для количественных измерений локального соотношения топливо/окислитель при постоянной температуре и давлении в отсутствие химической реакции [1]. Использование паров ацетона имеет ряд

преимуществ по сравнению с другими многоатомными молекулами: высокое давление насыщенных паров при комнатной температуре, спектр возбуждения флуоресценции позволяет использовать лазеры с высокой энергией импульса, достаточно короткое время флуоресценции, низкая токсичность, низкие затраты при засеивании потоков с высокими значениями расхода, совместимость с воздухом, низкая чувствительность к эффектам столкновительного тушения флуоресценции, высокий уровень сигнала. При комнатной температуре и атмосферном давлении ацетон обладает достаточно широкой полосой поглощения от 225 до 320 нм с максимумом в районе 275 нм. При возбуждении из основного состояния S_0 в первое синглетное состояние S_1 ацетон флуоресцирует в диапазоне 350 – 550 нм. Используя пары ацетона авторы работы [2] исследовали турбулентный перенос для струи в сносимом потоке лабораторного масштаба. С другой стороны, данный подход чрезвычайно работоспособен при измерениях в случае реалистичного расхода газа. Настоящая работа направлена на исследование структуры потока и массопереноса в горелочном устройстве газотурбинного типа, работающего по принципу сжигания предварительно перемешанной топливо-воздушной смеси.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерения проводились в холодной модели камеры сгорания газотурбинного типа. Горелочное устройство было разработано ОАО "Авиадвигатель" (г. Пермь). Диаметр сопла составлял 80 мм. Данное фронтное устройство обладает двумя каналами подачи топлива (в рамках данной работы топливо подавалось только через центральный канал). Поток основного воздуха поступал в камеру предварительного смешения по четырем шлангам, объединенным во впускной коллектор. Внутри барабана камеры предварительного смешения была установлена турбулизирующая сетка. Фронтное устройство обеспечивало достаточно высокую степень закрутки потока. В качестве модельного топлива использовался неон. Измерительная секция камеры сгорания представляла собой кварцевый цилиндр (внутренний диаметр 120 мм) и имела длину 170 мм.

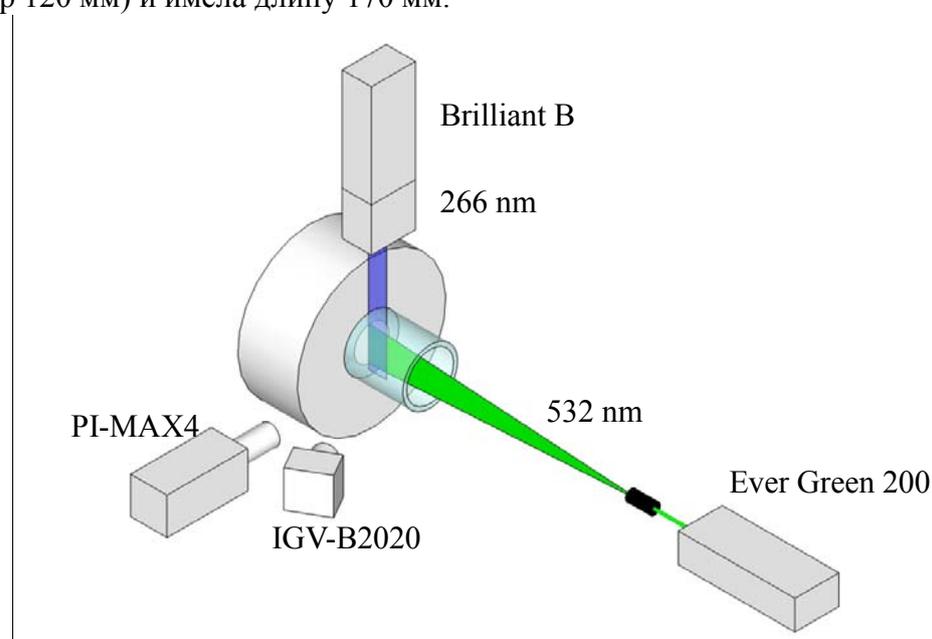


Рис. 1. Схема расположения оборудования для проведения одновременных PIV/PLIF измерений

Максимальный расход воздуха составлял 0,5 кг/с. Число Рейнольдса, построенное по диаметру сопла, вязкости воздуха и среднерасходной скорости составляло 300 000. Давление внутри камеры сгорания составляло 2 атмосферы с перепадом давления на фронтном устройстве 4 %. Газ подавался из ресивера с максимальным давлением 10 атм. Расход неона контролировался за счет использования расходомеров Bronkhorst снабженных

электромагнитными клапанами с обратной связью. Температура подаваемого воздуха составляла 17 °С. Чтобы обеспечить проведение PIV измерений основной поток засеивался частицами водоглицернивого раствора. При этом устройство для засева потока подключалось по байпасной схеме (перепад давления на нем не превышал 0,5 атмосферы). Устройство для засева потока парами ацетона, через которое подавался поток неона, представляло собой термостабилизированную емкость с жидким ацетоном. Таким образом, при постоянном расходе концентрация паров ацетона в потоке неона оставалась постоянной. Расход неона составлял 5,4 г/с.

Компоновка комбинированной PIV/PLIF системы относительной измерительной области представлена на рис. 1. Для измерения полей скорости применялась система основанная на методе PIV. Поток освещался второй гармоникой двойного импульсного Nd:YAG лазера (Quantel EverGreen 200) с энергией каждого импульса 200 мДж. Задержка между импульсами составляла 5 мкс. Регистрация трассерных изображений осуществлялась цифровой ПЗС-камерой (ImperX IGV-B2020), оснащенной объективом SIGMA AF 50 mm (F2,8 EX DG Macro). Объектив камеры оснащался узкополосным оптическим фильтром (Edmund Optics) с пропускающей способностью 60% на длине волны 532 нм и полной шириной пропускания на полувысоте, составляющей 10 нм. Задержка между импульсами лазера составляла 2 мкс, чтобы избежать эффекта потери частиц вследствие существенной третьей компоненты скорости.

Для возбуждения флуоресценции ацетона использовалась четвертая гармоника твердотельного Nd:YAG лазера (Brilliant B). Энергия импульса лазера на длине волны 266 нм составляла 70 мДж. УФ-излучение направлялось системой прямоугольных призм в специальную оптику (Sheet Optics, LaVision), разворачивавшую лазерный луч в коллимированный нож размером до 50 мм и толщиной менее 0,8 мм. Порядка 30 % интенсивности УФ-излучения отводилось в измеритель энергии (Coherent LabMax Top), что позволяло регистрировать энергию каждого импульса лазерного излучения. Учёт изменения энергии лазера от импульса к импульсу необходим при анализе и сравнении мгновенных изображений полей концентрации. Регистрация сигнала флуоресценции осуществлялась ПЗС-камерой с усилителем яркости изображения на основе электронно-оптического преобразователя (PI-MAX4, Princeton Instruments). Квантовая эффективность фотокатода s20 в спектральной области 290-320 нм составляет 25 %. Использовался кварцевый объектив LaVision UV-lens (f#2.8, 100 мм) с интерференционным полосно-пропускающим фильтром (280 – 600 нм) и полосно-заградительным фильтром (1064, 532, 355 нм). Время экспозиции камеры составляло 200 нс. Экспозиция осуществлялась в интервале между импульсами зеленого лазера.

Две эти измерительные системы были синхронизованы при помощи восьмиканального генератора импульсов (Berkeley Nucleonics BNC 575 TTL). Пространственное совмещение измерительных областей достигалось за счет использования двух оптических систем формирования лазерного ножа (коллимированного ножа для PLIF и расходящегося для PIV). Для совмещения измерительных областей PIV и PLIF систем в измерительный объем помещался лист фотобумаги. В процессе калибровки были получены изображения лазерных ножей, совпадающих с хорошей точностью. Для восстановления масштабного коэффициента в объем камеры сгорания помещалась плоская калибровочная мишень, что позволило провести пространственную калибровку и согласование PIV и PLIF камер. В течение нескольких минут после включения засева потока частицами водоглицеринового раствора стенки камеры сгорания становились непрозрачными. Определенную трудность представляло наличие отражений, а также выбор режима засева в попытках найти компромисс между прозрачностью стенок камеры сгорания и необходимой плотностью засева. Таким образом за один запуск максимальная статистика составляла 300 двойных изображений с частотой 5 Гц. Ансамбль, по которому производилось осреднение составил 4000 полей скорости и концентрации соответственно.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Так как PIV камера наблюдала измерительную область под углом к полученным изображениям была применена процедура коррекции перспективы. Для калибровки использовалась модель полиномов второго порядка [3]. Данные PIV эксперимента обрабатывались кросс-корреляционным итерационным алгоритмом с размером элементарной ячейки 64×64 пикс (финальный размер элементарной ячейки составил 32×32 пикс с 75% перекрытием). Использовалась валидация корреляционных максимумов по соотношению сигнал/шум и адаптивный медианный фильтр (5×5) для интерполяции ошибочных векторов. Пространственное разрешение составило 2 вектора скорости на 1 мм.

Как известно, сигнал флуоресценции паров ацетона пропорционален концентрации, если отсутствует насыщение (плотность энергии в лазерном ноже не превышает порог насыщения), а также если можно пренебречь эффектами поглощения энергии лазерного ножа. В работе [4] было установлено, что линейный режим при возбуждении ацетона на длине волны 266 нм (длительность импульса 10 нс) реализуется при плотности энергии 353 мДж/см^3 . В настоящей работе плотность энергии не превышала 140 мДж/см^3 . Отсутствие насыщения и поглощения проверялось перед проведением основной серии экспериментов.

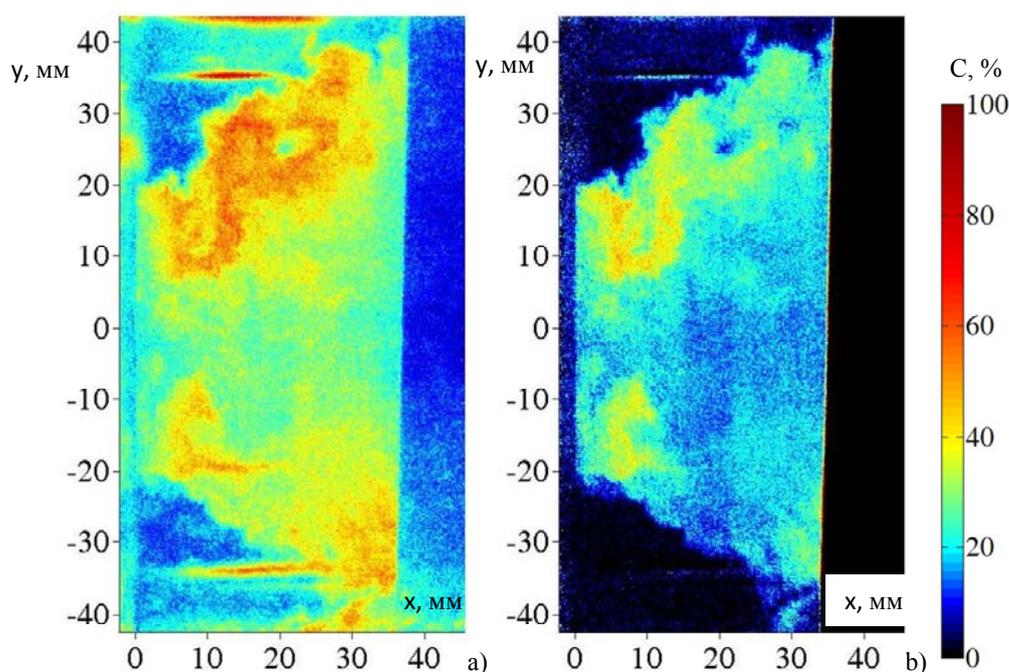


Рис. 2. Мгновенные изображения интенсивности флуоресценции паров ацетона до обработки (а) и после всех процедур коррекции (б)

После вычитания фонового сигнала изображения обрабатывались с использованием процедуры коррекции распределения интенсивности лазерного ножа, путем деления на калибровочное изображение. Калибровочное изображение было предварительно получено когда весь измерительный объем был однородно заполнен парами ацетона (производилось осреднение по 200 изображениям). Эта процедура позволяет учесть влияние таких факторов как виньетирование изображения, неоднородная чувствительность матрицы камеры, квантовая эффективность флуоресценции и пространственная неоднородность лазерного ножа. Для того, чтобы дополнительно повысить точность измерений каждое изображение корректировалось с учетом вариации интенсивности лазера. На рис. 2 представлен пример результата обработки мгновенного изображения. Направление лазерного ножа: сверху вниз. Данный пример показывает, что систематическая ошибка эксперимента была существенно уменьшена за счет применения процедур коррекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поле средней скорости представлено на рис. 3. Как можно видеть течение представляет собой сильно закрученный поток. После внезапного расширения возникает область обратного течения (показана красной линией на рис. 3). Максимальная скорость на выходе из горелочного устройства составляет 80 м/с.

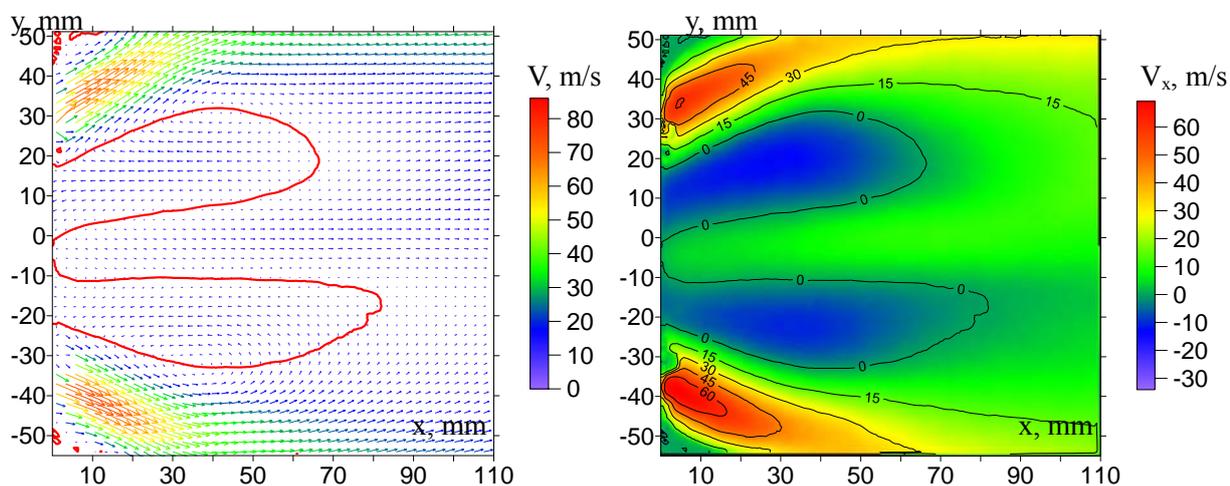


Рис. 3. Поле средней скорости (а) и аксиальной компоненты скорости (б)

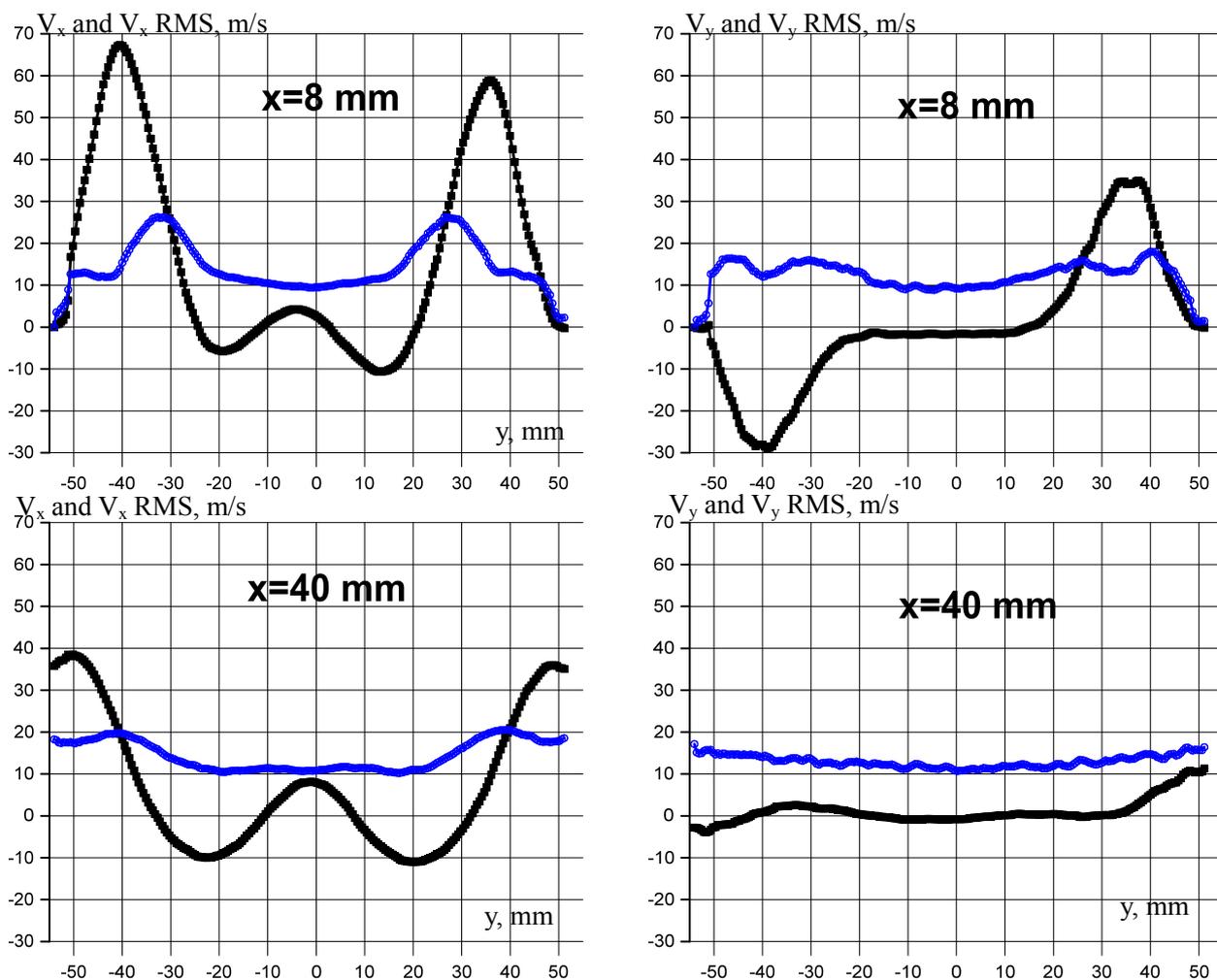


Рис. 4. Радиальные профили средней скорости (черная линия) и среднеквадратичное отклонение (синяя линия) аксиальной (V_x) и радиальной (V_y) компонент вектора скорости для различных расстояний от сопла

Центральная область течения имеет признаки наличия струйного течения (подача топлива осуществлялась через центральный канал фронтального устройства). Максимальная аксиальная скорость на оси достигает 20 м/с. Как и ожидалось, поток ускоряется вблизи стенки камеры сгорания. Максимум аксиальной скорости достигает стенки на расстоянии порядка 15 мм от сопла. Угловая зона рециркуляции не разрешена ввиду низкого соотношения сигнал/шум вблизи стенки камеры сгорания, вызванного отражениями лазерного ножа от фронтального устройства. Более детально структуру потока можно представить используя профили скорости (рис. 4). Аксиальная и радиальная компоненты средней скорости, а также среднеквадратичное отклонение для двух различных расстояний от сопла (0,1 и 0,5D соответственно) представлены на рис. 4.

Пульсации аксиальной компоненты монотонно возрастают с ростом расстояния от оси и достигают максимума в слое смешения. Радиальная компонента скорости имеет максимумы только в начальной области потока.

Как можно видеть (рис. 5), вниз по потоку максимум средней концентрации снижается в 1,6 раза. Вблизи фронтального устройства профиль средней концентрации имеет два ярко выраженных максимума. Эти максимумы отвечают взаимодействию центральной топливной струи с кольцевым закрученным потоком. На расстоянии порядка 0,5D от фронтального устройства присутствует уже только один максимум средней концентрации. Пульсации концентрации составляют порядка 30 % от максимума на выходе из фронтального устройства и достигают своего максимума во внутреннем слое смешения кольцевого закрученного течения. Вниз по потоку уровень пульсаций концентрации также остается существенным. Влияние потока на распространение пассивной примеси можно отчетливо наблюдать на рис. 6, который демонстрирует поле концентрации, наложенное на поле скорости. Изображения мгновенных величин показывают, что максимальные градиенты концентрации достигаются в области сдвигового слоя.

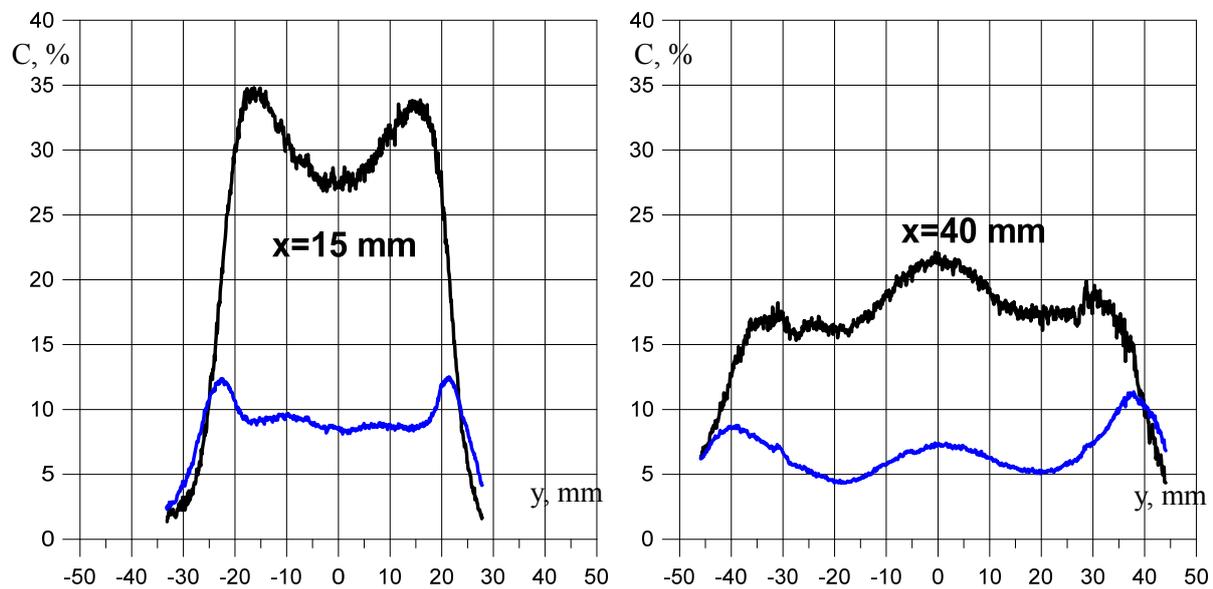


Рис. 5. Профили концентрации (черная линия) и пульсаций концентрации (синяя линия) для двух различных расстояний от сопла

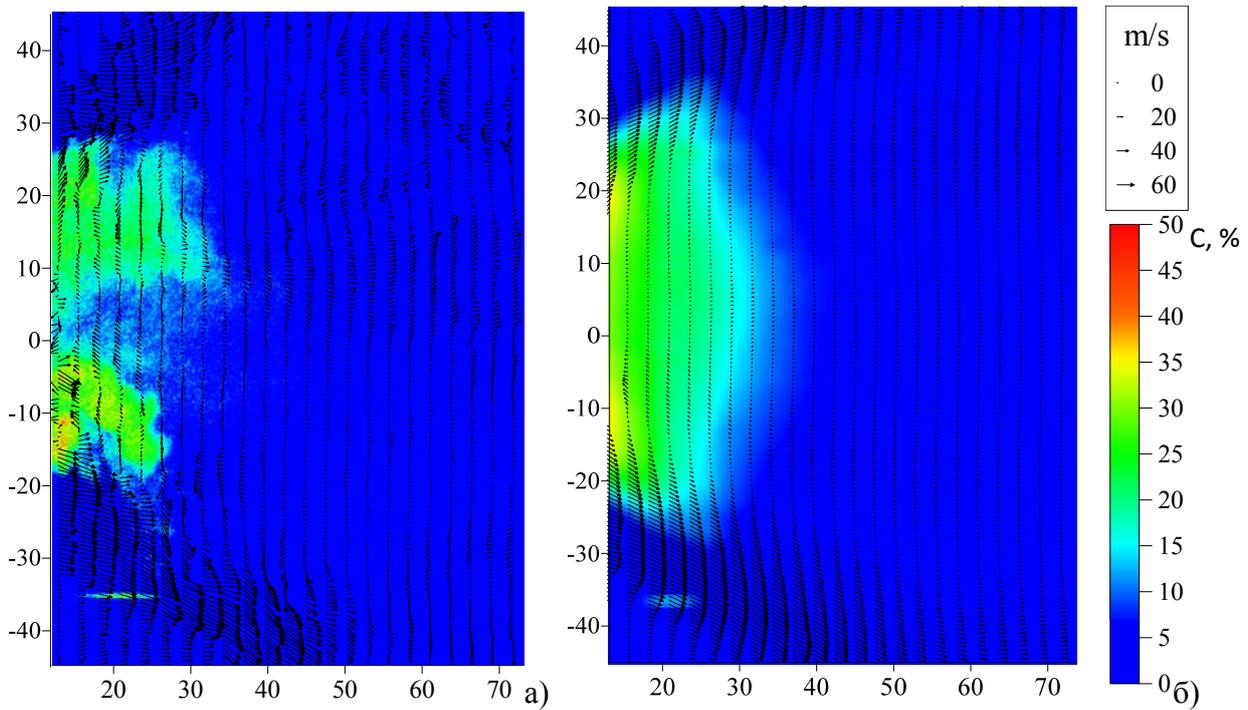


Рис. 6. Мгновенные (а) и осредненные (б) поля скорости и концентрации пассивной примеси в центральном сечении камеры сгорания ($Re=300\,000$)

Уравнение сохранения количества вещества для турбулентного потока может быть записано как:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = \frac{D \partial^2 \bar{c}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \langle u_j c \rangle}{\partial x_j} \quad (1)$$

где \bar{c} – осредненная по времени концентрация, c – пульсации концентрации, \bar{u}_j – осредненная по времени компонента скорости, u_j – пульсации компоненты скорости, D – коэффициент молекулярной диффузии.

Правая часть этого выражения выражает перенос массы. В турбулентных потоках при больших числах Рейнольдса член, выражающий молекулярную диффузию, может быть опущен ввиду малости по сравнению с турбулентной диффузией [5]. Таким образом, уравнение сохранения принимает следующую форму:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = - \frac{\partial \langle u_j c \rangle}{\partial x_j} \quad (2)$$

Для этого выражения при моделировании газодинамических процессов возникает проблема замыкания, которая обычно решается за счет предположения того, что турбулентный перенос пропорционален среднему градиенту концентрации (предположение закона Фика).

$$\langle u_j c \rangle = -Dt_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \quad (3)$$

Однако, для валидации модели данное предположение требует проверки. В рамках данной работы была проведена валидация данного предположения используя данные PIV/PLIF эксперимента.

На рис. 7 представлено распределение радиальной компоненты турбулентного потока

пассивной примеси и y -компоненты среднего градиента концентрации. Область обратного течения ограничена сплошной линией. Используя два этих распределения может быть установлена величина коэффициента турбулентной диффузии Dt .

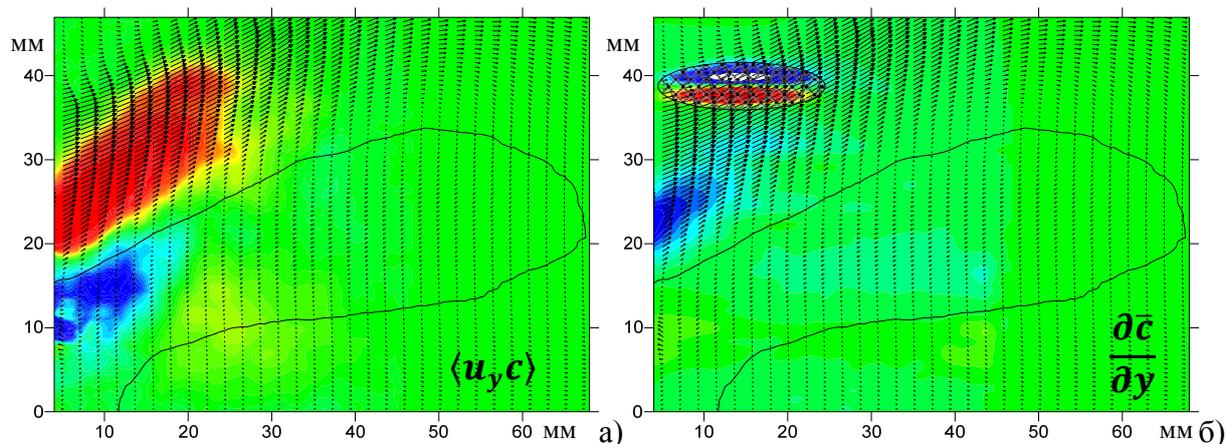


Рис. 7. Распределения радиальной компоненты турбулентного потока (а) и градиента концентрации (б)

На рис. 8 представлены радиальные профили радиальной компоненты турбулентного потока пассивной примеси и радиальной компоненты градиента средней концентрации. Как можно видеть, напрямую измеренные параметры турбулентного переноса находятся в хорошем соответствии с законом Фика, за исключением небольшой области контргradientного переноса вблизи $y \approx 10$ мм.

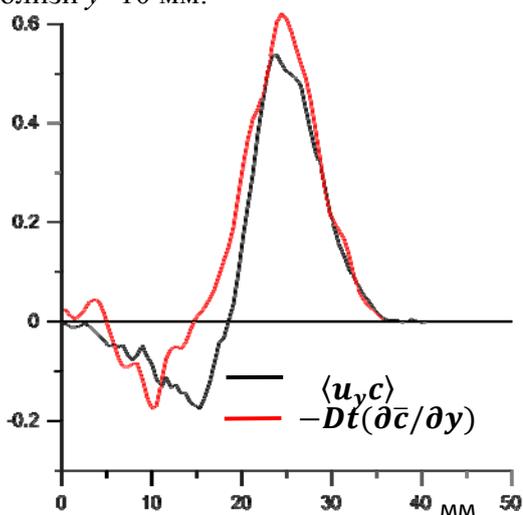


Рис. 8. Радиальные профили радиальной компоненты турбулентного потока и градиента концентрации

Другим весьма полезным параметром, который может быть получен с использованием данных одновременного PIV/PLIF эксперимента является турбулентное число Шмидта, которое представляет собой отношение скорости турбулентного переноса импульса и турбулентного переноса массы.

Так как $Sc_t = \nu_t / Dt$, распределения ν_t необходимы для вычисления Sc_t во всей измерительной области. Такие распределения могут быть получены из PIV данных используя распределения напряжений Рейнольдса и компонент градиента вектора скорости, которые представлены на рис. 9. Как можно видеть, экстремумы двух этих величин отличаются знаком и достигаются в области слоя смешения закрученного течения.

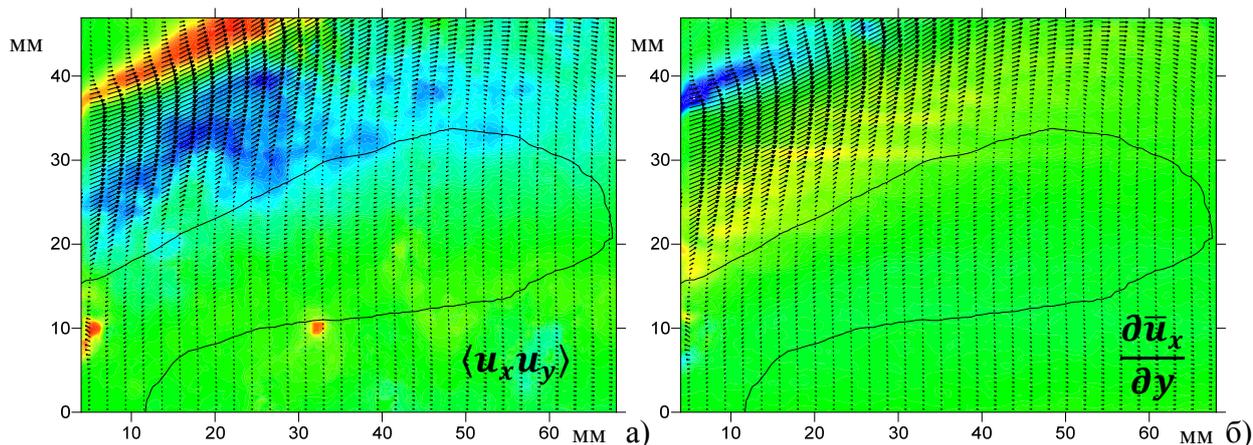


Рис. 9. Распределения напряжений Рейнольдса (а) и градиента аксиальной скорости (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы были проведены одновременные PIV/PLIF измерения в модели камеры сгорания газотурбинного типа при реалистичных значениях расхода. Результаты измерений включают двумерные мгновенные распределения поля концентрации пассивной примеси и поля скорости. Основной целью данной работы являлось исследование процессов турбулентного переноса в промышленных горелочных устройствах и получение экспериментальных данных для валидации моделей численного моделирования этих процессов. Несмотря на неидеальное качество кварцевого цилиндра и множественные переотражения лазерного излучения алгоритмы обработки позволили получить экспериментальные данные приемлемого качества. Результаты показывают, что пульсации концентрации и скорости достигают своего максимума в области слоя смешения. В результате экспериментов были получены характеристики турбулентного переноса пассивной примеси, а именно, коэффициент турбулентной диффузии и турбулентная вязкость, необходимые для построения турбулентного числа Шмидта. Было показано, что в целом распределения напряжений Рейнольдса и турбулентного потока пассивной примеси подтверждают градиентную гипотезу замыкания моментов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 14-29-00203 в НГУ, руководитель профессор Кемал Ханхялич)

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

PIV – панорамная анемометрия по изображениям частиц
 PLIF – панорамная лазерно-индуцированная флуоресценция
 S_0 – основное электронное состояние ацетона
 S_1 – первое возбужденное синглетное состояние
 C – концентрация пассивной примеси
 Re – число Рейнольдса
 V_x – аксиальная компонента скорости
 V_y – радиальная компонента скорости
 D_t – коэффициент турбулентной диффузии
 Sc_t – турбулентное число Шмидта
 ν_t – турбулентная вязкость

D – диаметр сопла фронтального устройства

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lozano, A., Smith, S. H., Mungal, M. G., and Hanson, R. K.** Concentration measurements in a transverse jet by planar laser-induced fluorescence of acetone // *AIAA J.*, 1993, Vol. 32, P. 218-221.
2. **Su L.K., Mungal M.G.** Mixing in cross-flowing jets: Turbulent quantities // 43rd Aerospace Science Meeting and Exhibit, 10-13 January, 2005, Reno, Nevada / AIAA 2005-305
3. **Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J.** Particle Image Velocimetry. A practical guide, Second Edition, Berlin, Springer. 2007
4. **Bryant R.A., Donbar J.M., Driscoll J.F.** Acetone laser induced fluorescence for low pressure/low temperature flow visualization // *Experiments in Fluids* 2000. Vol. 28, No. 5, P 471–476.
5. **Roberts P.J.W. and Webster D.R.** Turbulent diffusion, In: *Environmental Fluid Mechanics Theories and Application*. ASCE publications, Virginia 2002, P. 7-45

L.M. Chikishev^{1,2}, A.S. Lobasov^{1,2}, V.M. Dulin^{1,2}, V.V. Tsatiashvili³, V.G. Avgustinovich³, A.V. Bilsky^{1,2}, D.M. Markovich^{1,2}

¹*Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University 630090, Novosibirsk, Russia*

³*JSC Aviadvigatel 614010, Perm, Russia*

PIV/PLIF MEASUREMENTS OF MIXING PROCESSES IN TURBULENT FLOW ORGANIZED BY PERSPECTIVE GT-BURNER

In this work simultaneous velocity field and concentration field measurements at realistic flow-rates conditions were carried out in a cold flow premixed GT-burner. Acetone was seeded into the flow to provide quantitative fuel concentration measurements based on planar laser-induced fluorescence (PLIF). Velocity measurements were carried out using particle image velocimetry approach (PIV). Planar optical methods provide information required for CFD code verification and could not be obtained using pointwise techniques. Experimental data quality and processing algorithms provide turbulent transport characteristics.

PIV, ACETONE PLIF, SWIRLING FLOW, GT-BURNER