

УДК 532.574, 53.082.56

Исследование смесеобразования в модели камеры сгорания ГТУ с использованием панорамных оптических методов*

Л.М. Чикишев^{1,2}, В.М. Дулин^{1,2}, О.А. Гобызов^{1,2}, А.С. Лобасов^{1,2},
Д.М. Маркович^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет

E-mail: l.chikishev@gmail.com

С применением панорамных оптических методов на основе лазерно-индуцированной флуоресценции и анемометрии по изображениям частиц одновременно измерены поля мгновенной скорости потока и концентрации в нем пассивной примеси в модели камеры сгорания газотурбинной установки при реалистичных значениях расхода воздуха. Измерены пространственные распределения пульсаций скорости и концентрации пассивной примеси в турбулентном закрученном течении с расходом воздуха около 0,4 кг/с, а также распределения смешанных корреляций пульсаций скорости и концентрации пассивной примеси. Показано, что наиболее интенсивный турбулентный перенос наблюдается в области слоя смешения закрученного течения. Оценен вклад адвективной и турбулентной составляющих в перенос пассивной примеси в аксиальном направлении.

Ключевые слова: анемометрия по изображениям частиц, лазерно-индуцированная флуоресценция, пары ацетона, концентрация пассивной примеси, турбулентное течение, камера сгорания ГТУ.

Введение

Полнота смешения топлива и окислителя является важным фактором в процессе стабилизации пламени, а также влияет на уровень образования вредных выбросов (например NO_x). При проектировании современных горелочных устройств широко используются коммерческие расчетные коды, моделирующие газовую динамику. Одним из распространенных подходов для такого моделирования является использование осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS, Reynolds-averaged Navier–Stokes). В рамках этого подхода широко используются градиентные замыкающие соотношения, связывающие турбулентный перенос с градиентами осредненных величин. Важной задачей с точки зрения верификации численного расчета является проверка часто используемой градиентной гипотезы замыкания моментов второго порядка, для чего необходимо напрямую измерять корреляции пульсаций скорости и концентрации пассивной примеси.

Для проведения количественных измерений локального соотношения топливо/окислитель при постоянных температуре и давлении в отсутствие химических реакций может

* Работа была выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-29-00203).

быть использована панорамная лазерно-индуцированная флуоресценция (PLIF) паров ацетона [1]. Так, например, авторы работы [2] исследовали турбулентный массоперенос для струйных течений лабораторного масштаба в сносящем потоке, используя одновременные измерения методами панорамной лазерно-индуцированной флуоресценции и анемометрии по изображениям частиц (PIV).

Метод PLIF подразумевает подмешивание в поток молекулярных маркеров в малых концентрациях, которые не оказывают влияния на динамику среды (пассивная примесь), но позволяют использовать лазерное возбуждение молекул пассивной примеси и последующую их флуоресценцию для анализа распределения пассивной примеси в потоке [3]. Ацетон (CH_3COCH_3) является одним из наиболее подходящих маркеров благодаря своей низкой стоимости, малой токсичности и высокому давлению насыщенных паров [4], что обеспечивает эффективный засев потока при больших расходах газа. Интенсивность флуоресценции ацетона в режиме линейного возбуждения при постоянных давлении и температуре пропорциональна счетной концентрации его молекул [5]. Спектр возбуждения флуоресценции ацетона лежит в ультрафиолетовом диапазоне, при этом пары ацетона переизлучают в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра, что позволяет, применяя высокочувствительную регистрирующую аппаратуру, измерять поля мгновенной локальной концентрации этой пассивной примеси, а также комбинировать методы PLIF и PIV, используя спектральное разделение сигнала.

Настоящая работа посвящена исследованию структуры течения и распределения турбулентных пульсаций концентрации пассивной примеси в изотермическом потоке, формируемом фронтным устройством, осуществляющим перемешивание топлива и окислителя, в модели камеры сгорания газотурбинной установки (ГТУ). Проведение такого рода экспериментов при расходах газа, характерных для камер сгорания ГТУ, весьма затруднено вследствие проблем с организацией оптического доступа и созданием необходимой плотности засева потока трассерными частицами и молекулярными маркерами, однако эти задачи были успешно решены в рамках настоящей работы.

Экспериментальный стенд

Измерения проводились в изотермической модели камеры сгорания ГТУ при повышенном давлении (рис. 1). Использовалось фронтное устройство разработки ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь). Диаметр выходного сопла фронтного устройства составлял 80 мм, внутренний диаметр цилиндрической камеры сгорания — 120 мм, длина оптически прозрачного участка (кварцевый цилиндр) — 170 мм. Регулировка рабочего давления в камере сгорания осуществлялась выходным вентилем. Для контроля расхода

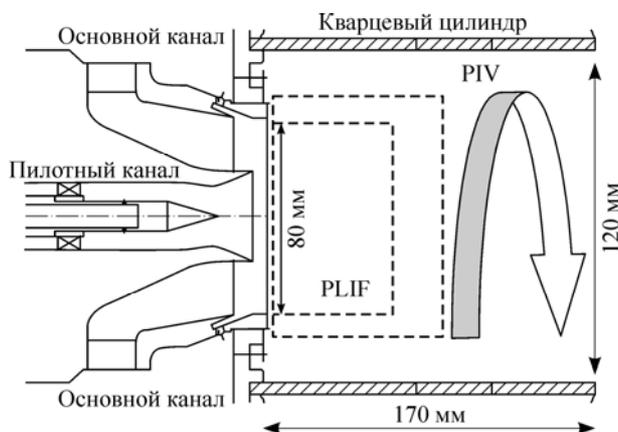


Рис. 1. Схема расположения измерительной области.

основного потока воздуха использовался вихревой расходомер. Для контроля расхода воздуха, подаваемого через пилотный канал, использовался расходомер-регулятор с электромагнитным клапаном (Bronkhorst). Контроль за температурой в воздушной магистрали и на входе во фронтное устройство, а также в устройстве для засева потока парами ацетона осуществлялся термометрами сопротивления, температура составляла 17 и 56 °С соответственно. Давление в модели камеры сгорания составляло 2 атм. Массовый расход воздуха через центральный топливный канал задавался равным 5,4 г/с, массовый расход воздуха через основной канал составлял 400 г/с. Число Рейнольдса, определенное по среднерасходной скорости, диаметру выходного сопла фронтного устройства и вязкости воздуха, составляло $1,4 \cdot 10^5$.

Методики измерений

Оптическая схема для одновременных измерений полей скорости и концентрации представлена на рис. 2. Измерения мгновенной концентрации проводились методом панорамной лазерно-индуцированной флуоресценции паров ацетона, добавленных в поток [6]. Молекулы ацетона возбуждались четвертой гармоникой излучения импульсного Nd:YAG-лазера (Quantel Brilliant B) на длине волны 266 нм, сигнал флуоресценции регистрировался в диапазоне от 320 до 600 нм с использованием объектива LaVision UV-lens 105/f#2.8. Регистрация сигнала флуоресценции осуществлялась ПЗС-камерой с усилителем яркости изображения на основе электронно-оптического преобразователя (Princeton Instruments, PI-MAX4) с фотокатодом s20.

Энергия импульса лазера составляла 70 мДж на длине волны 266 нм при длительности импульса 10 нс. Пучок лазера разворачивался в коллимированный лазерный нож шириной 50 мм и толщиной менее 0,8 мм в измерительной области. Объектив камеры также оснащался многополосным заградительным фильтром (Edmund Optics multi-notch filter), чтобы предотвратить попадание в камеру лазерного излучения с длиной волны 266, 355 и 532 нм. Длительность экспозиции фотокатода составляла 200 нс.

Одновременно с измерением полей концентрации регистрировались двумерные двухкомпонентные поля мгновенной скорости методом PIV. Для проведения PIV-измерений часть основного потока воздуха пропускалась через генератор аэрозоля, что обеспечивало засев потока мелкодисперсными частицами водоглицеринового раствора в малой

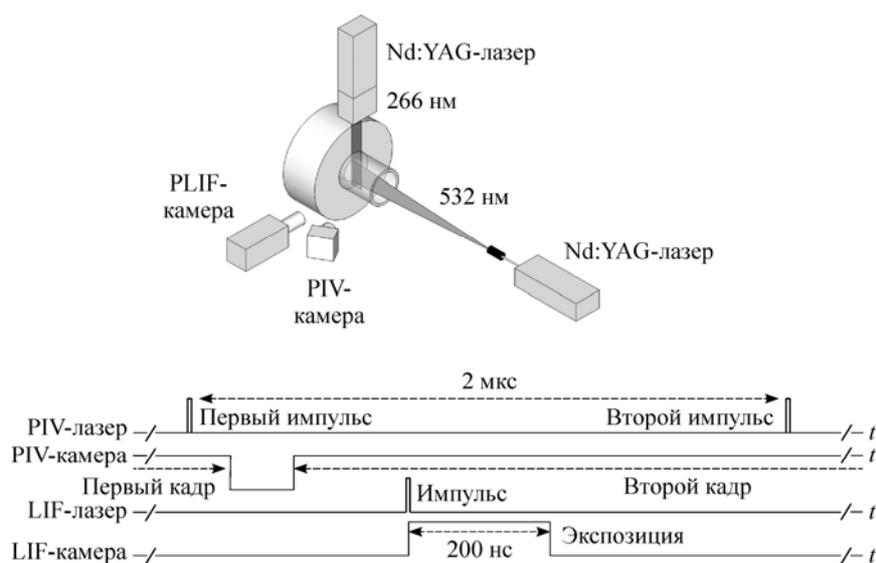


Рис. 2. Оптическая схема эксперимента и временная диаграмма.

массовой концентрации. Поток освещался расходящимся лазерным ножом, который формировался из пучка лазерного излучения, генерируемого двойным Nd:YAG-лазером Quantel EverGreen 200 на длине волны 532 нм (вторая гармоника). Импульсы лазерного излучения, энергия каждого из которых составляла 200 мДж, генерировались парами, с задержкой между импульсами в паре, равной 5 мкс, и частотой следования пар импульсов 5 Гц. Регистрация трассерных изображений осуществлялась цифровой ПЗС-камерой (ImperX IGV-B2020), оснащенной объективом SIGMA AF 50 mm (F2,8 EX DG Macro). Объектив камеры снабжался узкополосным оптическим фильтром (Edmund Optics) с коэффициентом пропускания равным 0,6, на длине волны 532 нм. Полная ширина пропускания фильтра на полувысоте составляла 10 нм. Синхронизация лазеров и камер осуществлялась с использованием восьмиканального генератора импульсов (Berkeley Nucleonics BNC 575 TTL, см. рис. 2). В экспериментах было измерено по 1500 мгновенных полей концентрации и полей скорости.

Для проведения калибровочных измерений рабочий объем установки заполнялся парами ацетона при атмосферном давлении. Калибровочные измерения проводились после того, как пары ацетона равномерно распределялись по всему объему рабочего участка. Давление насыщенных паров, а следовательно и объемная концентрация молекул ацетона, являются функцией температуры. Таким образом, в потоке, подаваемом через пилотный канал, концентрация ацетона всегда соответствует концентрации насыщенных паров при температуре 56 °С.

Обработка данных

Примеры изображений, полученных в эксперименте, представлены на рис. 3. PIV-изображения регистрировались с разрядностью 8 бит. Размер измерительной области для PIV составлял 70×90 мм, разрешение изображения — 1540×1895 пикселей. Камера, регистрирующая PLIF-изображения, работала в шестнадцатиразрядном режиме, размер измерительной области для PLIF составлял 40×90 мм (520×1024 пикселей). При этом пространственное разрешение, с которым регистрировались PIV изображения, было приблизительно в два раза меньше разрешения для PLIF изображений.

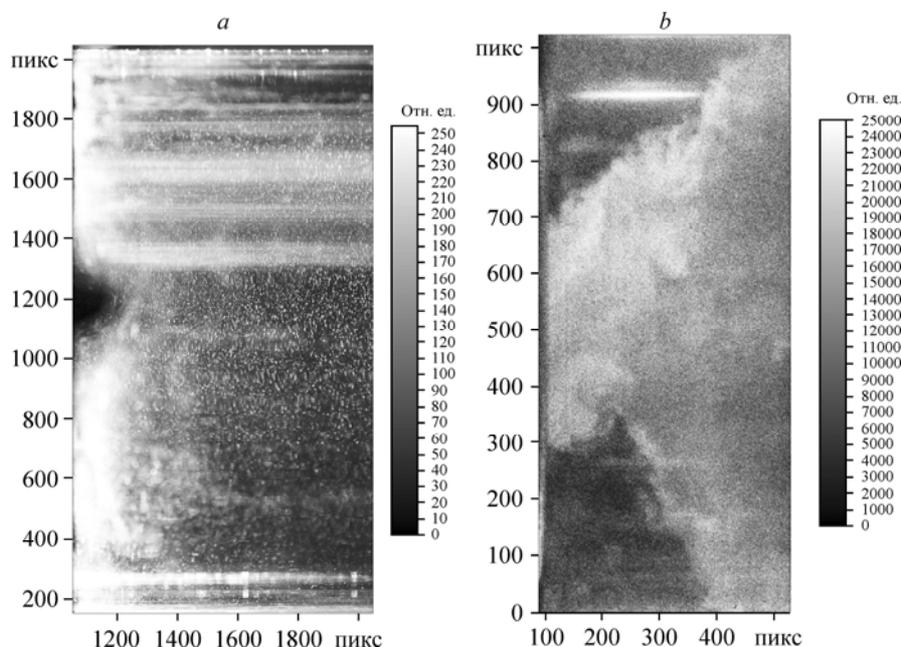


Рис. 3. Изображения частиц (а) и паров ацетона (b).

Обработка трассерных картин проводилась с помощью итерационного кросскорреляционного алгоритма со следующими параметрами: размер начальной расчетной ячейки — 64×64 пикс, один шаг дробления (конечный размер 32×32 пикс), пространственное перекрытие ячеек — 75 %. Осуществлялась валидация каждого вектора по соотношению сигнал/шум и по величине отклонения от медианного значения, определенного по окрестности 5×5 векторов. Отсеянные в ходе валидации значения скорости интерполировались локальным средним значением, также определявшимся по окрестности 5×5 векторов. Конечное пространственное разрешение поля скорости составило порядка двух векторов на миллиметр.

При обработке PLIF-изображений проводилась коррекция неоднородности освещенности измерительной области лазерным ножом, для этого использовались калибровочные изображения, полученные при заполнении всего рабочего объема камеры сгорания насыщенными парами ацетона в равномерной концентрации (в отсутствие потока). При этом равномерная счетная концентрация паров ацетона C_0 может быть оценена как $2,24 \cdot 10^{25}$ шт/м³.

Пространственное совмещение двух лазерных ножей (коллимированного ножа для измерений методом PLIF и расходящегося — для PIV) в измерительной плоскости проверялось с использованием фотобумаги. Лист фотобумаги помещался перпендикулярно измерительной плоскости, после чего регистрировались изображения ультрафиолетового и зеленого лазерных ножей. Перед проведением эксперимента в измерительную область помещалась плоская калибровочная мишень, которая располагалась в плоскости совмещения обоих лазерных ножей. Зарегистрированные камерами изображения мишени использовались для приведения PIV- и PLIF-данных к общей системе координат.

Результаты измерений

На рис. 4 представлены поля средней скорости газа и концентрации пассивной примеси. Течение представляет собой закрученный поток с образованием центральной зоны возвратного течения, по центру которой осуществляется впрыск модельного топлива. Таким образом, в потоке присутствуют три области сдвигового течения, где

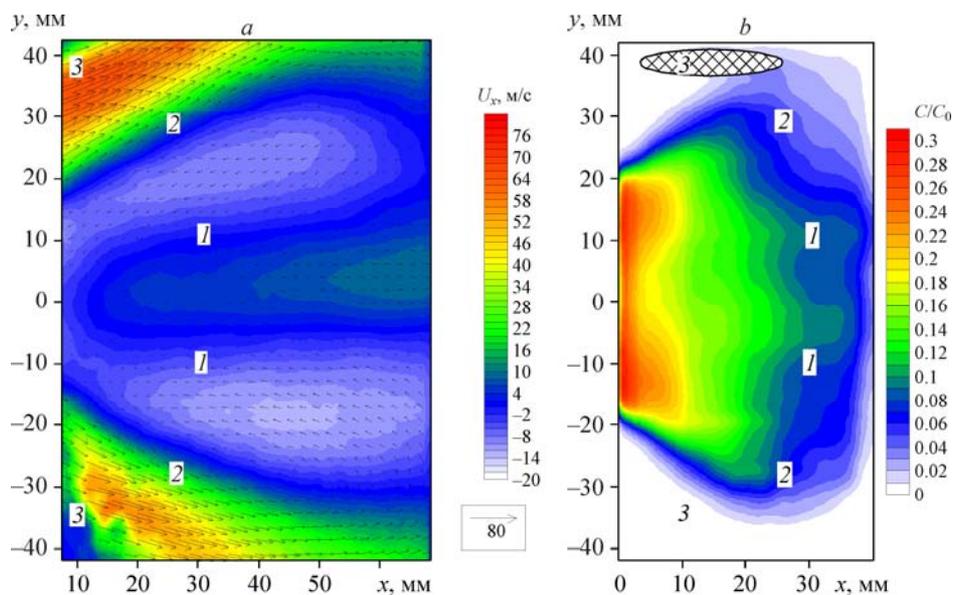


Рис. 4. Поля средней скорости (а) и средней концентрации (б) пассивной примеси.

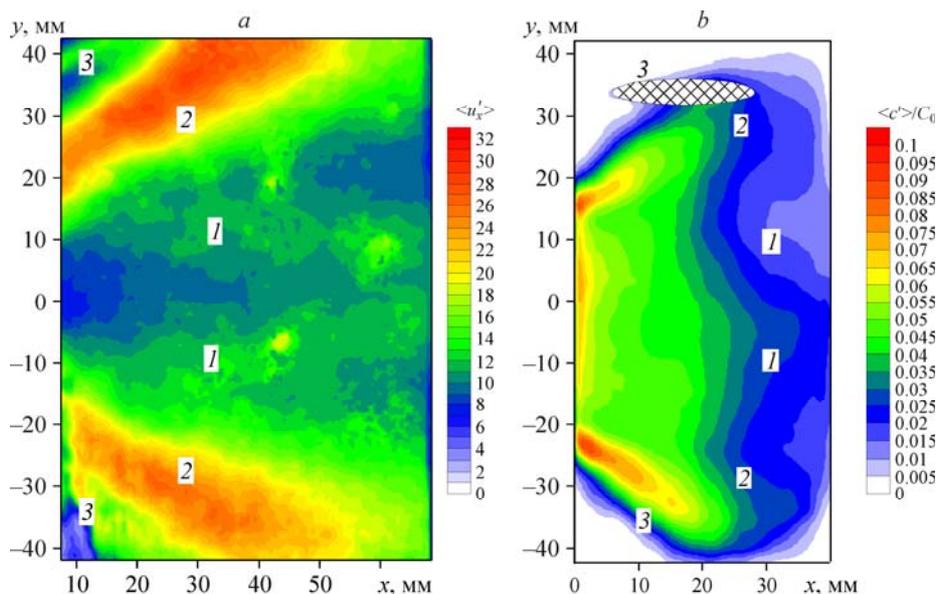


Рис. 5. Распределение интенсивности пульсаций аксиальной компоненты скорости (а) и пульсаций концентрации (б) пассивной примеси.

можно ожидать наличия интенсивных турбулентных пульсаций скорости и концентрации (обозначены на рис. 4–6 цифрами 1–3). Отличная от нуля концентрация модельного топлива достигается только в области, ограниченной углом раскрытия закрученного потока воздуха (что обусловлено конструкцией фронтального устройства).

Распределения интенсивности пульсаций аксиальной скорости и пульсаций концентрации пассивной примеси представлены на рис. 5. Пульсации аксиальной компоненты вектора скорости малы в центральной области и достигают своего максимума в области 2, что соответствует слою смешения потоков, поступающих из основного и пилотного каналов фронтального устройства. В то же время интенсивность пульсаций концентрации в области возвратных токов 1 относительно мала.

На рис. 6 представлено распределение аксиальной компоненты турбулентного потока пассивной примеси. В отличие от компонент адвективного переноса, максимум аксиальной компоненты турбулентного переноса пассивной примеси достигается внутри центральной зоны рециркуляции. В области слоя смешения аксиальные компоненты адвективного и турбулентного переноса имеют разный знак (противоположно направлены). Характерные значения адвективной составляющей в 5–10 раз превышают значения турбулентной составляющей. Таким образом, для оценки расходных характеристик достаточно учитывать только вклад адвекции.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование структуры течения и переноса пассивной примеси на начальном участке турбулентного течения с закруткой потока в модели камеры сгорания ГТУ. Методами панорамной анемометрии по изображениям частиц и лазерно-индуцированной флуоресценции измерены ансамбли двумерных полей скорости и концентрации пассивной примеси в плоскости симметрии течения при реалистичных значениях расхода газа. Определена структура течения: выделены области

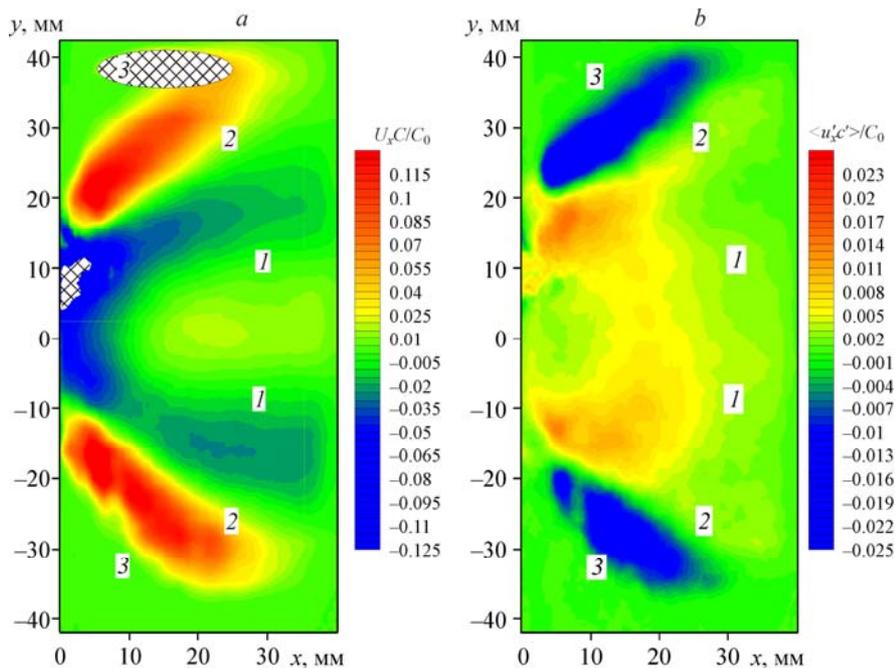


Рис. 6. Распределение аксиальной компоненты адвективного потока (а) и турбулентного потока (б) пассивной примеси (области, в которых влияние оптических бликов приводит к ошибочным результатам измерений, покрыты штриховкой).

интенсивных турбулентных пульсаций скорости и концентрации пассивной примеси. Измерены поля смешанных корреляций пульсаций скорости и концентрации пассивной примеси. Показано, что наиболее интенсивный турбулентный перенос пассивной примеси наблюдается в слое смешения закрученного течения. Для этого слоя характерны противоположные знаки аксиальной компоненты адвективного и турбулентного переноса пассивной примеси. Применение панорамных оптических методов позволило получить важную для верификации модели замыкания вторых моментов информацию, которая не может быть получена в ходе точечных измерений.

Список условных обозначений

U_x — средняя аксиальная скорость потока,	u'_x — пульсационная компонента аксиальной скорости,
C — средняя локальная счетная концентрация паров ацетона,	c' — пульсационная компонента концентрации паров ацетона,
C_0 — среднее значение счетной концентрации паров ацетона при калибровке,	$\langle \dots \rangle$ — осреднение по ансамблю.

Список литературы

1. Lozano A., Smith S.H., Mungal M.G., Hanson R.K. Concentration measurements in a transverse jet by planar laser-induced fluorescence of acetone // AIAA J. 1993. Vol. 32, No. 1. P. 218–221.
2. Su L.K., Mungal M.G. Simultaneous measurements of scalar and velocity field evolution in turbulent crossflowing jets // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 513. P. 1–45.
3. Thurber M., Hanson R. Simultaneous imaging of temperature and mole fraction using acetone planar laser-induced fluorescence // Exp. Fluids. 2001. Vol. 30, iss. 1. P. 93–101.

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, iss. 5. P. 471–476.
5. **Lozano A., Yip B., Hanson R.K.** Acetone: a tracer for concentration measurements in gaseous flows by planar laser-induced fluorescence // Experiments in Fluids. 1992. Vol. 13, No. 6. P. 369–376.
6. **Thurber M. C., Grisch F., Kirby B. J., Votsmeier M., Hanson R. K.** Measurements and modeling of acetone laser-induced fluorescence with implications for temperature imaging diagnostics // Appl. Opt. 1998. Vol. 37, No. 21. P. 4963–4978.

*Статья поступила в редакцию 2 июня 2016 г.,
после доработки — 14 июля 2016 г.*