

03:09

Панорамная спектроскопия спонтанного комбинационного рассеяния для диагностики струйных реагирующих потоков с использованием перестраиваемого фильтра Лию—Эмана

© Д.К. Шараборин, Д.М. Маркович, В.М. Дулин

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

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: sharaborin.d@gmail.com

Поступило в Редакцию 18 мая 2017 г.

Приведены результаты исследования пространственного распределения плотности в потоке закрученной турбулентной струи с горением предварительно перемешанной метановоздушной смеси на основе регистрации интенсивности стоксовой ветви спонтанного комбинационного рассеяния колебательно-вращательных переходов азота. Представлена апробация оптической системы на базе Nd:YAG-лазера и перестраиваемого оптического фильтра Лию—Эмана на жидких кристаллах на основе измерений поля температуры и плотности для ламинарного пламени в форме конуса. Сделан вывод, что различие данных, измеренных по интенсивности стоксовой составляющей спонтанного комбинационного рассеяния азота и по ее отношению к антистоксовой составляющей, не превышает 5% в диапазоне от 300 до 1800 К.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.02.45462.16879

В настоящее время при проектировании камер сгорания и горелочных устройств повсеместно применяются программы математического расчета. Однако достоверное численное моделирование турбулентных потоков с горением на данный момент является одной из наиболее сложных задач вычислительной гидроаэродинамики. Сегодня активно используют оптические методы экспериментальных исследований реагирующих потоков, основанные на регистрации поглощенного и рассеянного излучения молекулами, а также лазерно-индуцированной

флуоресценции и фосфоресценции [1–4], в том числе с целью верификации результатов численного моделирования. Широкое применение получили методы регистрации при освещении плоскости потока и панорамной регистрации.

Спектроскопия спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) позволяет проводить точечные измерения локальной температуры и состава газа. Измерения могут быть также выполнены вдоль пучка лазера [5]. При освещении выбранной плоскости потока и панорамной регистрации СКР в процессе колебательно-вращательных переходов возможны измерения локальной концентрации молекул в областях без горения [6,7]. Развитие методов диагностики газовых реагирующих потоков на основе регистрации СКР остается актуальным и в настоящее время ввиду совершенствования оптоэлектронных устройств [8,9]. Целью настоящей работы является исследование влияния тепловыделения в процессе горения на пространственное распределение плотности в турбулентной закрученной струе на основе панорамной регистрации интенсивности СКР с использованием перестраиваемого фильтра Лию–Эмана. В работе выполнена апробация метода регистрации для ламинарного потока при горении предварительно перемешанной смеси в форме конуса.

Количество фотоэлектронов I_{SRS} , зарегистрированное каждым фоточувствительным элементом оптического регистратора в результате СКР, определяется локальной интенсивностью лазерного излучения I_{las} , передаточной функцией T_{opt} (которая учитывает размер апертуры, прозрачность используемых оптических элементов и чувствительность фотоприемника), локальной концентрацией молекул N , участвующих в рассеянии, и сечением рассеяния:

$$I = I_{\text{SRS}} + I_b = T_{\text{opt}} I_{\text{las}} N \frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} + I_b. \quad (1)$$

В итоговом сигнале I также присутствует и паразитный сигнал I_b , в том числе вызванный шумом (темновой ток при внешнем фотоэффекте и тепловой шум при внутреннем), нежелательными переотражениями и возможной флуоресценцией. То обстоятельство, что сечение рассеяния линейно поляризованного излучения зависит от угла между вектором поляризации лазерного излучения и направлением системы визирования θ как $\sin^2 \theta$, может быть использовано для оценки уровня шума и фонового сигнала.

В приближении локального термического равновесия распределение двухатомных молекул по энергетическим уровням $E_i(\nu, J)$, где (ν, J) — колебательное и вращательное квантовые числа, описывается распределением Больцмана

$$f_{\nu, J}(T) = \frac{g_i}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_i(\nu, J)}{kT}\right), \quad (2)$$

где g_i — степень вырождения энергетических уровней, $Z(T)$ — статистическая сумма, $E_i(\nu, J)$ — энергия уровня, k — постоянная Больцмана, T — температура. Следовательно, отношение количества зарегистрированных фотонов в результате СКР при стоксовых и антистоксовых колебательных переходах зависит от локальной температуры (при одинаковой квантовой эффективности):

$$\frac{I_S}{I_{AS}} = \frac{S_S (\omega_0 + \omega_k)}{S_{AS} (\omega_0 - \omega_k)} = \left(\frac{\omega_0 - \omega_k}{\omega_0 + \omega_k}\right)^3 \exp\left(\frac{\hbar\omega_k}{kT}\right), \quad (3)$$

где ω_0 — волновое число падающего излучения лазера, ω_k — сдвиг волнового числа в процессе комбинационного рассеяния, \hbar — редуцированная постоянная Планка. Соотношение локальной интенсивности стоксовых линий СКР (а также менее интенсивных антистоксовых) для различных молекул может быть использовано для оценки отношения их концентраций. Суммарная интенсивность стоксовых и антистоксовых составляющих рассеяния для определенного типа молекул позволяет оценить их локальную концентрацию.

В работе проведено исследование влияния тепловыделения в процессе горения на пространственное распределение локальной плотности в закрученной струе с горением путем регистрации интенсивности СКР с использованием перестраиваемого фильтра Лио–Эмана на основе жидких кристаллов. Для освещения была использована вторая гармоника импульсного Nd:YAG-лазера (532 nm, энергия импульсов длительностью ~ 6 ps составляла 0.7 J). С использованием коллимирующей оптики лазерный луч разворачивался в „нож“ шириной 45 mm и толщиной менее 0.8 mm в измерительной области. Установленная перед коллиматором $\lambda/2$ пластина позволила зарегистрировать сигнал в условиях $\theta = 0$ и $\pi/2$ (с целью повышения соотношения сигнал–шум при оценке величины I_b). Для регистрации сигнала СКР была использована ССД-камера с электронно-оптическим преобразователем и

усилителем Princeton instruments PI-MAX-4 (фотокатод S20, размер матрицы 1024×1024 пикселей, динамический диапазон 16 bit). Камера работала в режиме накопления по 250 импульсам лазера с экспозицией при каждом импульсе длительностью 30 ns. Для повышения соотношения сигнал–шум было проведено осреднение по области из 8×8 пикселей. Также было проведено осреднение интенсивности изображения по 50 реализациям. В результате пространственное разрешение составило 0.5 mm. Интенсивность сигнала СКР была зарегистрирована для диапазонов 607.3 ± 7 и 473.3 ± 5 nm с использованием узкополосного перестраиваемого фильтра на основе жидких кристаллов (VariSpec LC).

Для организации потока с горением было использовано профилированное осесимметричное сопло формы Витошинского с устанавливаемым внутрь лопаточным завихрителем. Внутренний диаметр выходного сечения сопла составлял $d = 15$ mm. Были проведены измерения в ламинарном потоке при горении пламени в форме конуса и в турбулентном потоке закрученной струи при горении предварительно перемешанной смеси с избытком воздуха. Коэффициент избытка топлива в первом и втором случаях был равен $\Phi = 0.9$ и 0.7 соответственно.

На рис. 1 представлены пространственные распределения интенсивности сигнала стоксовой и антистоксовой ветвей СКР молекул азота в ламинарном пламени в форме конуса. Во всех случаях представлена разность сигналов для $\theta = 0$ и $\pi/2$, позволившая повысить соотношение–сигнал шум за счет уменьшения вклада от среднего значения I_b . Соотношение сигнал–шум для стоксовой составляющей в продуктах горения не превышает 10:1. Антистоксова составляющая может быть измерена с приемлемой точностью только в продуктах горения, где температура превышала 1500 K (рис. 2), а соотношение сигнал–шум достигало 5:1. Распределение локальной температуры, полученное на основе данных рис. 1, *a* и *b* с использованием уравнения (3), представлено на рис. 2, *b*. Данные об изменении локальной концентрации молекул азота в продуктах горения по сравнению с окружающим воздухом были получены на основе результатов, представленных на рис. 1, *a*, и пространственного распределения интенсивности сигнала стоксовой ветви СКР молекул азота в воздухе без горения. Сравнение результатов измерения локальной температуры на основе СКР (в том числе на основе модели идеального газа в предположении постоянной молярной доли азота) с данными измерений термпарой

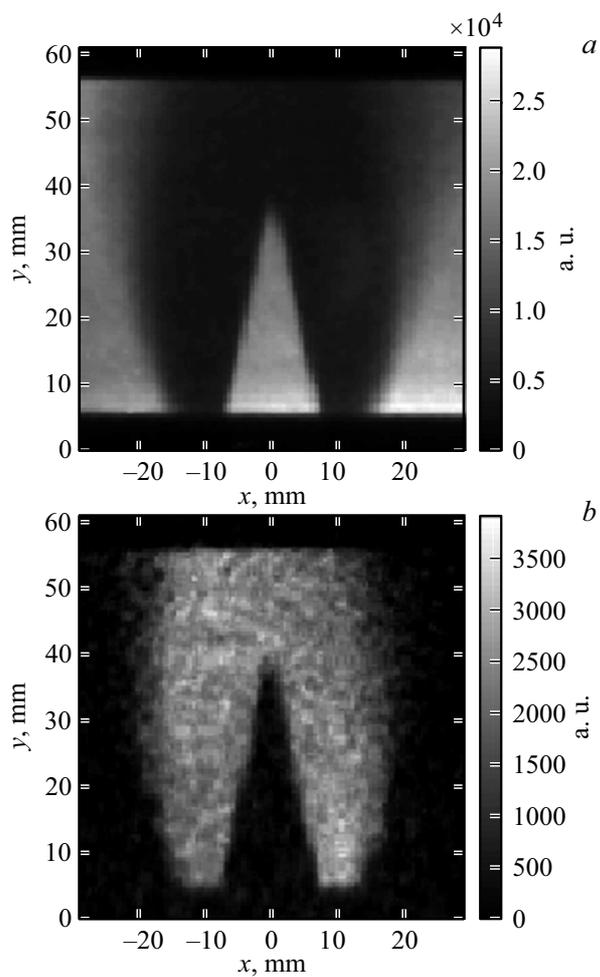


Рис. 1. Интенсивность локального СКР молекул азота в пламени в форме конуса. Стоксова (*a*) и антистоксова (*b*) ветви колебательно-вращательных переходов.

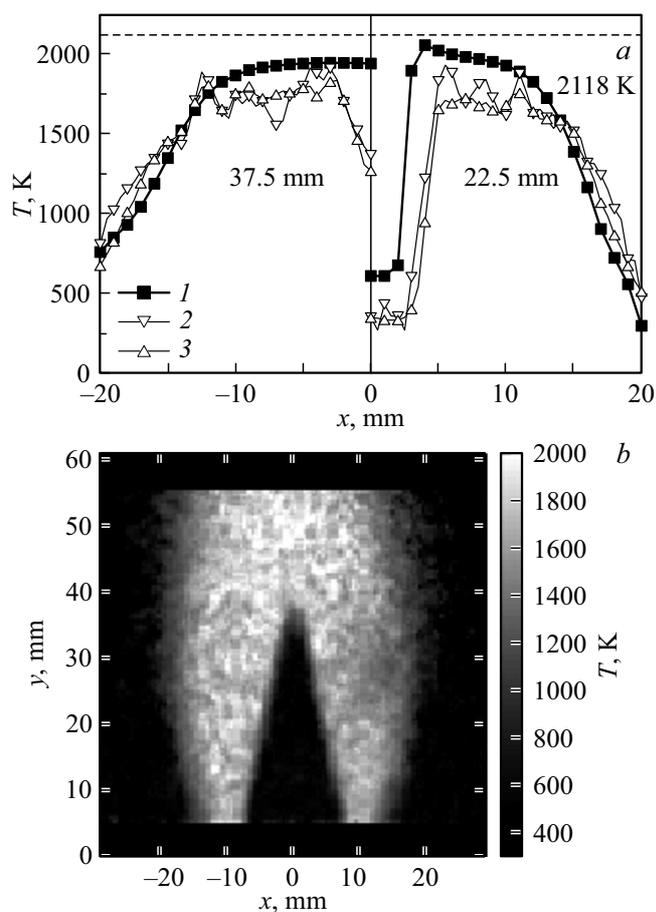


Рис. 2. *a* — сравнение профилей температуры, измеренных термопарой, и СКР-данных (1 — термопара; 2, 3 — данные СКР, измеренные по соотношению интенсивности при стоксовых и антистоксовых переходах и на основании модели идеального газа соответственно) на расстоянии от сопла 37.5 mm (слева) и 22.5 mm (справа); *b* — локальная температура газа в конусном пламени.

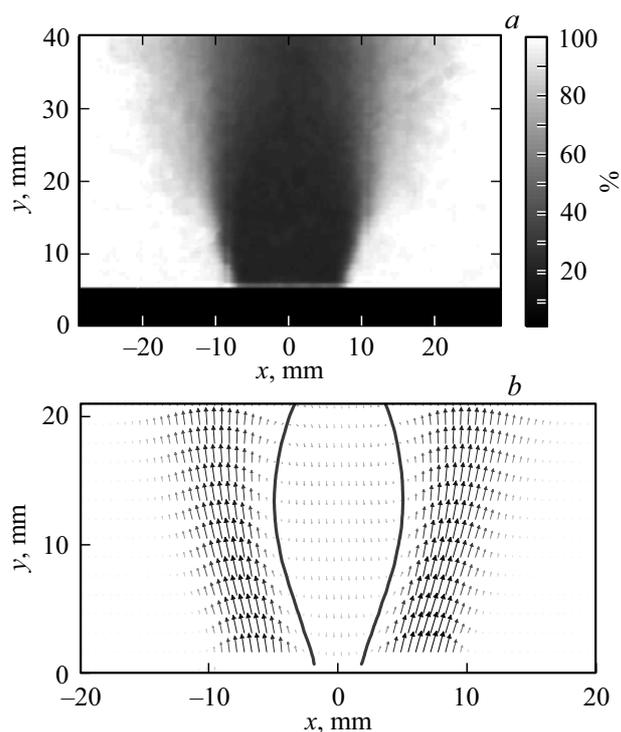


Рис. 3. Осредненные по времени относительная концентрация молекул азота (а) и скорость газа для закрученной турбулентной струи с горением (b).

(тип *B* — платина—родий/платина—родий, потери на излучение были учтены) для двух сечений над соплом представлено на рис. 2, а. Адиабатическая температура для смеси метан—воздух при нормальных условиях, отношении азота к кислороду в окислителе 79/21 и эквивалентном отношении топлива $\Phi = 0.9$ составляет 2118 К. Обнаружено, что термопара вносит изменения в структуру потока и приводит к искажению фронта пламени вплоть до его стабилизации на самой термопаре. В результате профиль температуры, измеренный термопарой внутри конуса пламени, отличается от данных бесконтактных измерений. В области продуктов горения, вниз по потоку от фронта

пламени, наблюдается хорошее согласие результатов, полученных контактным методом и на основе СКР. Различие данных, измеренных по интенсивности стоксовой составляющей СКР азота и по ее отношению к антистоксовой составляющей, не превышает 5% в диапазоне от 300 до 1800 К.

На рис. 3 представлены результаты измерений в турбулентном потоке закрученной струи с горением. Степень закрутки потока (определяемая как отношение момента импульса к импульсу струи с учетом радиуса выходного отверстия сопла) была настолько велика, что в процессе истечения в открытое пространство и расширения струи в ней образовалась центральная зона рециркуляции (см. распределение поля средней скорости на рис. 3, *b*, данные работы [10]). Распределение локальной плотности молекул азота (относительно окружающего воздуха) представлено на рис. 3, *a*. На основе сравнения поля средней скорости и плотности сделан вывод, что в центральной зоне рециркуляции скапливаются горячие продукты горения, максимальная температура которых может быть оценена в 1500 К при адиабатической температуре пламени данной смеси в 1819 К.

Таким образом, в работе проведена апробация панорамной оптической системы для регистрации поля температуры и плотности в струйных реагирующих потоках и сделан вывод, что различие в значениях температуры, определенных на основе отношения стоксовой и антистоксовой составляющих СКР азота и в приближении модели идеального газа на основе стоксовой составляющей, не превышает 5% в диапазоне от 300 до 1800 К.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-19-10566.

Список литературы

- [1] *Stricker W.P., Kohse-Höinghaus K., Jeffries J.B.* // Combustion, an international series. N.Y. Taylor and Francis. 2002. P. 155–193.
- [2] *Hassel E.* // J. Appl. Opt. 1993. V. 32. N 21. P. 4058–4065.
- [3] *Кобцев В.Д., Козлов Д.Н., Кострица С.А., Смирнов В.В., Стельмах О.М.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 12. С. 90–97.
- [4] *Мухеев Г.М., Калюжный Д.Г., Попов А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 24. С. 61–68.
- [5] *Rabenstein F., Leipertz A.* // J. Appl. Opt. 1998. V. 37. N 21. P. 4937–4943.

- [6] *Webber B.F., Long M.B., Chang R.K.* // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 35. N 2. P. 119–121.
- [7] *Leipertz A., Knapp K.* // Heat Mass Transf. 1984. V. 18. N 4. P. 237–245.
- [8] *Ajrrouche H., Lo A., Vervisch P., Cessou A.* // Meas. Sci. Technol. 2015. V. 26. N 7. P. 075501.
- [9] *Kojima J., Nguyen Q.-V.* // Meas. Sci. Technol. 2008. V. 19. N 1. P. 015406.
- [10] *Шараборин Д.К., Дулин В.М., Маркович Д.М.* // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 1. P. 39–44.