

УДК 536.46

## ЛАМИНАРНОЕ ПРОПАНОВОЗДУШНОЕ ПЛАМЯ В СЛАБОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

П. К. Третьяков<sup>1</sup>, А. В. Тупикин<sup>1</sup>, Н. В. Денисова<sup>1</sup>, О. В. Ганеев<sup>1</sup>,  
В. В. Замашников<sup>2</sup>, Ю. С. Козорезов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. А. С. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск  
tupikin@itam.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск

<sup>3</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

При анализе влияния электрического поля на горение газов рассматриваются три механизма воздействия: омический нагрев, влияние на кинетику химических реакций и, наиболее обоснованно, ионный ветер. Приведенные в работе экспериментальные данные свидетельствуют о локальном воздействии электрического поля непосредственно на зону химических реакций, что вызывает деформацию фронта пламени.

Ключевые слова: гомогенное горение, электрическое поле, распределение скоростей, метод эмиссионной томографии.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы экологии в настоящее время приобретают первостепенное значение. Особое внимание уделяется разработке способов снижения выхода  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  при сжигании природного газа в промышленных энергетических установках. Как правило, усилия направлены на решение задач по обеспечению стабильного горения в области бедных смесей. Предлагаемые способы основаны на различных механизмах. Например, рассматривается воздействие локализованного энергоисточника с целью снижения периода индукции и времени химической реакции или изменения гидродинамической структуры течения. Источником энергии может служить лазерное излучение, СВЧ и электрические разряды различного типа [1–5]. Интерес к использованию импульсно-периодического электрического поля (ЭП) вызван тем, что при сравнительно небольшой его мощности (несколько ватт) возможны значительные изменения в процессе горения (увели-

чение скорости распространения пламени на 20 ÷ 30 %) [6]. При изучении влияния ЭП на горение рассматривают три механизма: тепловой, гидродинамическое воздействие ионного ветра и кинетический [7]. Полагается, что реализация того или иного механизма зависит от физико-химических свойств горючего, гидродинамических условий, геометрии ЭП, его напряженности и частоты [8]. Развитие средств оптической диагностики потоков, включая течения реагирующих смесей, таких как PIV (particle image velocimetry), LIF (laser induced fluorescence) [9], и средств томографической обработки данных [10] расширяет возможности изучения влияния ЭП на структуру зоны горения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния ЭП на фронт ламинарного пропановоздушного пламени горелки типа Бунзена. Методом восстановления высокоградиентного источника излучения по интегральному свечению объекта проведено томографическое восстановление радиальных профилей излучения радикала  $\text{SH}$  по данным спектральной регистрации. Методом PIV определены поля скоростей, включая режимы перестройки фронтов при импульсно-периодическом воздействии. Выполнен анализ результатов томографических исследований, и дано их сопоставление с измерениями поля локальных скоростей.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке программой фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН № 1 «Фундаментальные проблемы горения и детонации в энергетике» (проект 1.2) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-01-00158-а).

© Третьяков П. К., Тупикин А. В., Денисова Н. В., Ганеев О. В., Замашников В. В., Козорезов Ю. С., 2012.

## СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование влияния ЭП на процессы горения проводилось на горелке Бунзена. В качестве топлива взят пропан. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Внутренний диаметр трубки 13.5 мм; ее длина 800 мм, что достаточно для формирования профиля скоростей Пуазейля при выбранных расходах смеси. Расход газов измеряли регуляторами расхода Bronkhorst ElFlow (с точностью не хуже 1 %). Для создания ЭП использовали кольцевые электроды диаметром 20 мм, расстояние между ними 25 мм, и плоскопараллельные пластины размером 70 × 60 мм, расстояние между ними 30 мм. В импульсно-периодическом режиме напряжение (до 3 кВ) на электроды подавалось через высоковольтный ключ, управляемый задающим генератором.

Мгновенные поля скорости регистрировали с помощью PIV-системы «ПОЛИС». Система разработана в ИТ СО РАН и состоит из сдвоенного Nd:YAG импульсного лазера (70 мДж в каждом импульсе длительно-стью не более 10 нс), ПЗС-камеры (разрешение 2048 × 2048, 8 бит, экспозиция 128 мс) и синхронизатора. В экспериментах задержка между парой импульсов варьировалась в диапазоне 10 ÷ 50 мкс. Так как экспозиция камер существенно превышала длительность лазерного импульса, подсвечивающие трассерные частицы в измерительной плоскости, камеры были оснащены узкополосными оптическими фильтрами, пропускавшими излучение лазера (532 нм) и подавлявшими собственное свечение пламени. Камера PIV-системы располагалась под прямым углом к плоскости измерения. Для формирования лазерного но-

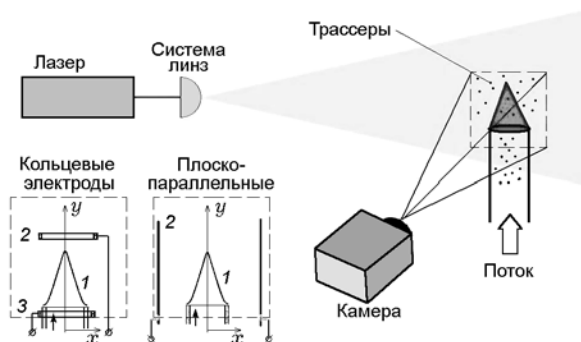


Рис. 1. Схема эксперимента:  
1 — пламя, 2, 3 — электроды

жа использовали фокусирующую и цилиндрическую линзы. Измерения проводили в центральной плоскости пламени. Поток засеивался частицами оксида титана (средний диаметр 1 мкм). Достаточно малый размер частиц позволял хорошо отслеживать структуру потока (время релаксации частиц  $\approx 10$  мкс). Управление системой, сбор, хранение и обработку данных осуществляли при помощи компьютера с программным обеспечением «ActualFlow». Спектрональную регистрацию фронта пламени проводили на длинах волн радикалов OH и CN, применяя для этого соответствующие наборы фильтров; изображение фиксировалось CCD-камерой с усилителем изображения, входящей в состав системы «FlameMaster» фирмы «LaVision».

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ МЕТОДОМ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ

В основе применяемого метода эмиссионной томографии лежит предположение, что коэффициент эмиссии прямо пропорционален плотности излучающих молекул. Изображения типа представленного на рис. 2, *a* и соответствующие им цифровые матрицы называют в томографии проекционными данными. На рис. 2, *b* показан профиль интегральной интенсивности  $I$  свечения пламени на длине волны радикала CN в сечении пламени, обозначенном стрелкой на рис. 2, *a*.

Рассматриваемое пламя обладает цилиндрической симметрией относительно оси потока, поэтому для реконструкции пространственных параметров достаточно результатов измерений с одного ракурса наблюдения. Предполагая, что коэффициент поглощения в условиях эксперимента пренебрежимо мал (т. е. пламя оптически прозрачно в выбранном диапазоне длин волн), а внешние источники излучения отсутствуют, уравнение переноса можно привести к двумерному уравнению Радона [11] и для его решения использовать алгоритм реконструкции на основе метода максимума энтропии [12, 13]. Задачи томографической реконструкции принадлежат к классу некорректно поставленных обратных задач, которые характеризуются неустойчивостью решения, особенно в случае функции источника, имеющей разрывный характер или резкие градиенты. Для бедных смесей пламя горелки Бунзена — ламинарное, с узкой зоной реакции, и вид функ-

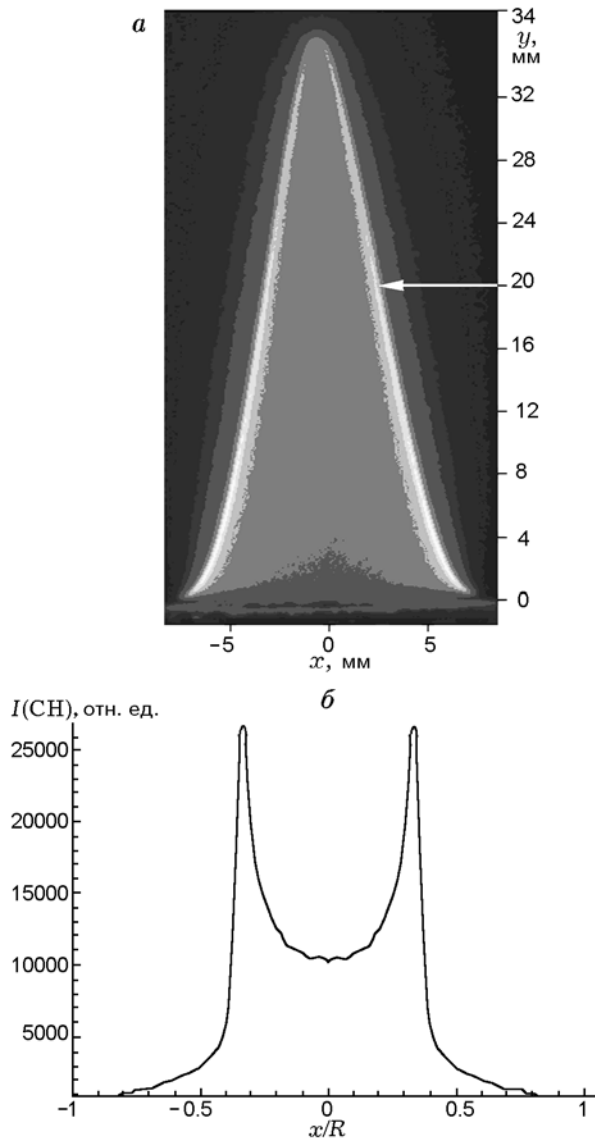


Рис. 2. Пропановоздушное пламя:  
*a* — снимок, *б* — интегральная интенсивность свечения

ции источника является высокоградиентным. Результаты исследования устойчивости этого алгоритма реконструкции для данного класса функций представлены в [14].

На основе описанного метода проведено восстановление пространственного распределения радикала CN для ламинарного пропановоздушного пламени в отсутствие ЭП и при его воздействии на пламя (рис. 3). Полученные данные свидетельствуют о локальном воздействии ЭП на зону химических реакций. Степень деформации фронта горения зависит от концентрации носителей заряда, образуя-

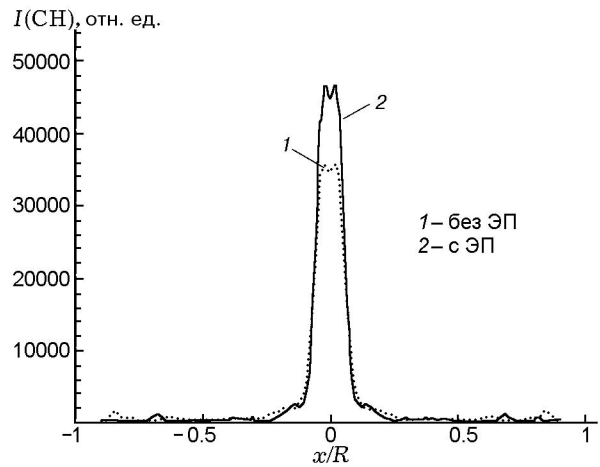


Рис. 3. Томографическое восстановление пространственного распределения радикала CN в вершине пламени

щихся в результате реакций хемоионизации. В верхней части пламени на единицу поверхности приходится больший расход смеси, поэтому концентрация ионов там выше, чем на других участках фронта. Изменения в структуре центральной части незначительны, что дает основание предположить отсутствие воздействия ЭП на процессы в предпламенной зоне. Для проверки этого необходима информация о поле скоростей при воздействии на пламя ЭП.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ МЕТОДОМ PIV

В тонком фронте пламени происходит сильное изменение температуры и скорости. Наличие большого градиента компонент скорости приводит к большим погрешностям измеряемых значений.

На рис. 4 представлен пример регистрации: получаемое изображение и определенное по нему поле скоростей (без ЭП, среднemasсовая скорость смеси  $v = 0.7$  м/с, коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1.35$ ). На рис. 5 приведены компоненты скорости на высоте 9 мм от среза горелки ( $x$  — радиальное направление,  $y$  — вдоль потока). Напряжение 2 кВ. Данные рис. 5 свидетельствуют, что компонента скорости по оси  $x$  в предпламенной зоне близка к нулю как при наличии поля, так и в его отсутствие, а значения компоненты скорости по оси  $y$  различаются мало, в пределах точности измерений. С другой стороны, поскольку данные взяты из различных опытов, некоторое от-

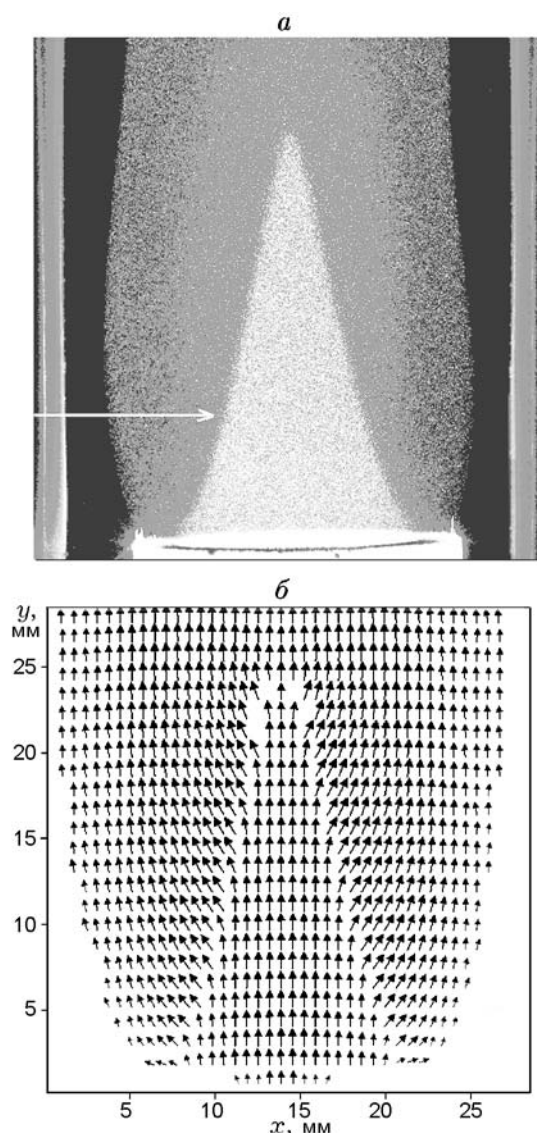


Рис. 4. Регистрация скоростей пропановоздушного пламени горелки типа Бунзена методом PIV:

*a* — получаемое изображение, *б* — поле скоростей

личие может быть следствием того, что от опыта к опыту общий расход смеси не сохранялся постоянным. Таким образом, скорость потока в предпламенной зоне (внутри конуса пламени) не изменяется при включении ЭП, заметные изменения происходят в области реакции и за зоной горения. Этот факт подтверждает, что ЭП оказывает воздействие непосредственно на зону реакции, при этом заметное уменьшение компоненты скорости по оси  $y$  свидетельствует о деформации фронта пламени.

В случае плоскопараллельных электродов

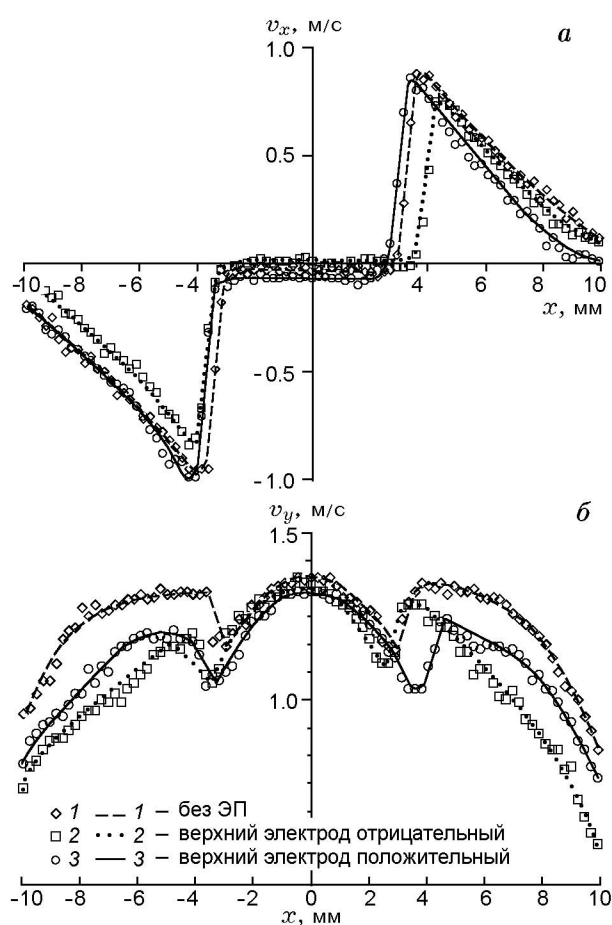


Рис. 5. Компоненты скорости для осесимметричного случая

исследована динамика перестройки поля скоростей при включении/выключении ЭП (без ЭП,  $v = 0.9$  м/с,  $\alpha = 1.2$ ). На рис. 6 представлены распределения компонент скорости потока в сечении на высоте 20 мм от среза горелки в различные моменты времени в течение одного опыта. Ось  $x$  направлена от отрицательного к положительному электроду. В области продуктов сгорания горизонтальная компонента со стороны отрицательного электрода (при  $x = -6$  мм) возрастает приблизительно на  $0.2 \div 0.3$  м/с, со стороны положительного электрода (при  $x = 6$  мм) практически не изменяется. В направлении  $y$  максимальное значение скорости со стороны отрицательного электрода уменьшается, а со стороны положительного возрастает. В предпламенной зоне компонента скорости по оси  $x$  по линии наблюдения остается постоянной, но происходит изменение ее величины во времени и отмечается смещение максимума, что свидетельствует об отклоне

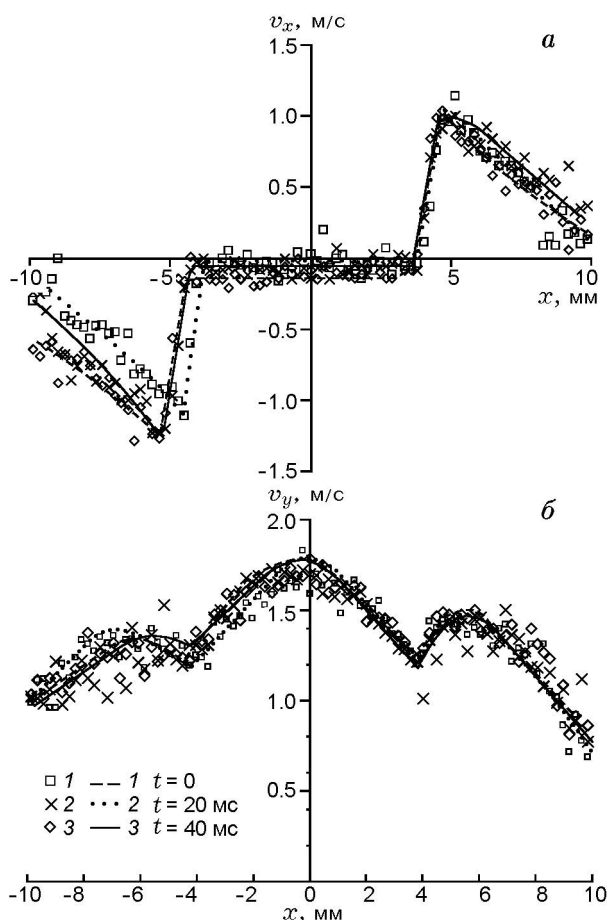


Рис. 6. Компоненты скорости в случае плоско-параллельных электродов

нении потока исходной смеси в сторону отрицательного электрода при смещении фронтов. Полученные распределения локальных скоростей хорошо согласуются с динамикой перестройки фронтов, представленной в работе [15].

На рис. 7 показаны значения нормальных скоростей горения (нормальных к фронту горения составляющих скорости потока) в момент включения поля и через 30 мс. Отметим, что чем ближе к срезу сопла (чем больше  $|z|$ ), тем меньше различие нормальных скоростей. Вблизи вершины пламени значение нормальной скорости уменьшается со стороны отрицательного электрода и возрастает со стороны положительного. Потери давления во фронте горения для ламинарных режимов оцениваются по формуле

$$\Delta p = \rho u_n^2 (\theta - 1),$$

где  $\rho$  — плотность исходной смеси,  $u_n$  — нор-

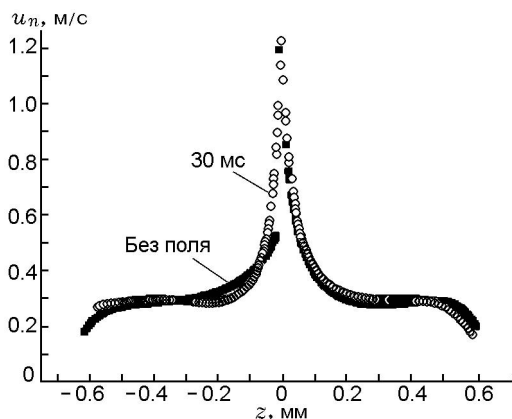


Рис. 7. Нормальная скорость горения

мальная к фронту пламени составляющая скорости смеси,  $\theta$  — отношение температуры продуктов сгорания к температуре холодной смеси. Таким образом, при включении ЭП со стороны положительного электрода увеличивается сопротивление фронта пламени по отношению к набегающему потоку (так как  $u_n$  возрастает). Со стороны отрицательного электрода наблюдается обратный эффект.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях сохранения симметрии пламени при воздействии ЭП поле скоростей в предпламенной зоне (внутри конуса пламени) остается неизменным, т. е. отсутствует воздействие на гидродинамическую структуру течения горючей смеси перед фронтом пламени. При этом происходит деформация фронта горения и увеличивается скорость его распространения. Это подтверждается ростом интенсивности излучения радикала СН в вершине конуса пламени, зафиксированным при томографической реконструкции профилей интенсивности излучения радикалов СН. Можно сказать, что воздействие ЭП локализовано в зоне протекания химических реакций, а механизм воздействия связан с деформацией пламени — его растяжением. Необходимо отметить, что при несимметричном воздействии ЭП смещение фронтов горения под действием ЭП приводит к отклонению исходного потока.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Tanoff M. A., Smooke M. D., Teets R. E., Sell J. A. Computational and experimental

- studies of laser-induced thermal ignition in premixed ethylene-oxidizer mixtures // *Combust. and Flame*. — 1995. — V. 103, N 4. — P. 253–280.
2. **Chou M., Zukowski T. J.** Ignition of  $H_2/O_2/NH_3$ ,  $H_2/Air/NH_3$  and  $CH_4/O_2/NH_3$  mixtures by excimer-laser photolysis of  $NH_3$  // *Combust. and Flame*. — 1991. — V. 87, N 2. — P. 191–202.
  3. **Старик А. М., Титова Н. С.** О возможности интенсификации цепных реакций в горючих смесях при возбуждении электронных состояний молекул  $O_2$  лазерным излучением // *Докл. АН*. — 2003. — Т. 391, № 4. — С. 471–477.
  4. **Воронцов С. С., Третьяков П. К., Тупикин А. В.** Воздействие на ламинарное пламя пропановоздушной смеси импульсно-периодического излучения  $CO_2$ -лазера // *Хим. физика*. — 2010. — № 1. — С. 53–57.
  5. **Aleksandrov N. L., Kindysheva S. V., Kirpichnikov A. A., Kosarev I. N., Starikovskaya S. M., Starikovskii A. Yu.** Plasma decay in  $N_2$ ,  $CO_2$  and  $H_2O$  excited by high-voltage nanosecond discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2007. — V. 40. — P. 4493–4502.
  6. **Третьяков П. К., Тупикин А. В., Зудов В. Н.** Воздействие лазерным излучением и электрическим полем на горение углеводородовоздушных смесей // *Физика горения и взрыва*. — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 77–85.
  7. **Лаутон Дж., Вайнберг Ф.** Электрические аспекты горения. — М.: Энергия, 1976.
  8. **Ягодников Д. А., Воронецкий А. В.** Влияние внешнего электрического поля на особенности процессов воспламенения и горения // *Физика горения и взрыва*. — 1994. — Т. 30, № 3. — С. 3–12.
  9. **Troiani G., Marrocco M., Giammartini S., Casciola C. M.** Counter-gradient transport in the combustion of premixed  $CH_4/air$  annular jet by combined PIV/OH-LIF // *Combust. and Flame*. — 2009. — V. 156. — P. 608–620.
  10. **Proceedings** of International Conference on imaging techniques in subatomic physics, astrophysics, medicine, biology and industry, 8–11 June, Stockholm, Sweden, 2010.
  11. **Radon J.** Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten // *Berl. Verh. Sachs. Akad.* — 1917. — Bd 69. — S. 262–277.
  12. **Frieden B. R.** Restoring with maximum likelihood and maximum entropy // *J. Opt. Soc. Amer.* — 1972. — V. 62, N 4. — P. 511–518.
  13. **Minerbo G.** MENT: A maximum entropy algorithm for reconstructing a source from projection data // *Comput. Graph. Image Process.* — 1979. — V. 10, N 1. — P. 48–68.
  14. **Denisova N. V., Tupikin A. V.** Study of burning processes by using emission tomography method [CD-ROM] // *Proc. of XV Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research*, Novosibirsk, 2010.
  15. **Воронцов С. С., Ганеев О. В., Третьяков П. К., Тупикин А. В.** Динамика фронта ламинарного пламени гомогенной пропановоздушной смеси при импульсно-периодическом воздействии электрического поля // *Физика горения и взрыва*. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 29–32.

*Поступила в редакцию 16/VI 2011 г.*