

УДК 536.46

ДИФФУЗИОННЫЙ ФАКЕЛ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

А. В. Тупикин^{1,2}, П. К. Третьяков¹, Н. В. Денисова¹, В. В. Замашников³,
В. С. Козулин^{1,2}

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

²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

³Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск

Выполнено экспериментальное исследование влияния электрического поля, вектор напряженности которого вращается вокруг оси факела, на форму диффузионного пламени пропана. Применение спектрально-интенсивностной регистрации позволило получить информацию о распределении интенсивности излучения на длинах волн промежуточных продуктов реакции (ОН, СН и С₂). Изменение положения максимума интенсивности собственного излучения пламени на различных длинах волн свидетельствует о влиянии такого электрического поля на процессы смешения, а именно об их интенсификации в сравнении с режимом без воздействия. Это может оказаться полезным для повышения эффективности сжигания газообразного углеводородного топлива.

Ключевые слова: диффузионное горение, электрическое поле, спектрально-интенсивностная регистрация, интегральное излучение.

DOI 10.15372/FGV20160205

ВВЕДЕНИЕ

Принцип управления горением с помощью электрического поля (ЭП) основан на наличии свободных зарядов в пламенах. Для различных топлив количество носителей заряда (ионов и свободных электронов) различно, в углеводородных пламенах концентрация заряженных частиц может достигать $\approx 10^{12}$ см⁻³, что на несколько порядков выше равновесных значений. При горении углеводородов в промежуточных реакциях образуется значительное количество разнообразных ионов, в частности Н₃O⁺, СН₃⁺, СНО⁺, НСО₃⁻ и др. В [1] показано, что определяющую роль в образовании ионов в пламенах играет хемоионизация. Существует множество цепей реакции, в которых идентифицировано около 50 типов различных ионов. В определенных условиях концентрация отрицательных ионов может быть высокой, но все же значительно меньше, чем положительных ионов [2]. Поэтому роль основных носителей отрицательного заряда игра-

ют свободные электроны. Наличие даже слабого внешнего ЭП приводит к перераспределению зарядов и потенциала в пламени. Воздействие ЭП на пламя связывают с тремя возможными механизмами: тепловым (диссипация электрической энергии при протекании заряда); электрогидродинамическим (обычно трактуется как влияние ионного ветра); кинетическим (непосредственное влияние поля на протекание химических реакций) [3]. Так как подвижность электронов выше, то при наложении ЭП, направленного по нормали к плоскому фронту пламени, преобладают силы, действующие на область положительного заряда, и газодинамические характеристики течения со стороны отрицательного электрода изменяются сильнее. Влияние ЭП на теплоперенос вблизи фронта отражается на степени растяжения фронта пламени [4], что особенно важно в случае нестационарного воздействия ЭП. Импульсно-периодическое ЭП может оказывать более сильное воздействие, чем постоянное. Существует предложение практического применения импульсно-периодического ЭП для повышения безопасности и контроля горения [5]. Особенности, связанные с организацией горения и конфигурацией ЭП, проанализи-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-01-00255-а).

зированы в работе [6], и показана невозможность обобщения данных, полученных разными авторами. Научный и практический интерес представляют схемы с организацией воздействия ЭП на диффузионный режим горения. В [7] в кинетической схеме были учтены реакции хемоионизации, а в качестве ведущего механизма рассмотрено гидродинамическое воздействие ионного ветра на стабилизацию диффузионного факела. Оказалось, что при включении поля могут возникать колебания пламени, объяснения которым не были даны. Свидетельства нелинейного характера влияния частоты и напряженности переменного ЭП на характеристики пламени представлены в [8].

Данная работа посвящена исследованию влияния электрического поля, вектор напряженности которого вращается вокруг оси факела, на диффузионное пламя пропана. Такая постановка задачи объединяет в себе влияние нестационарных процессов и пространственной конфигурации ЭП на процессы смешения и горения.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на горелке диффузионного типа (из непроводящего материала) с внутренним диаметром $d_0 = 1$ мм, внешним диаметром $d_1 = 6$ мм (рис. 1). Напряжение подавалось попарно (+, -) на 8 тонких электродов, расположенных равномерно по кругу

диаметром $D = 14$ мм на высоте $h = 12$ мм от горелки. Последовательное переключение электродов проводилось вращением двойного ключа, замыкающего/размыкающего контакты на источник питания. Частота подачи напряжения и форма импульса регистрировались осциллографом Tektronix. Величина напряжения устанавливалась высоковольтным источником питания ВРПИТ-250-0,4. Расход пропана контролировался регулятором расхода EFlow с точностью 0.5 %.

Регистрация геометрии диффузионного пламени ($Re \approx 200 \div 400$) осуществлялась по собственному свечению радикалов СН, ОН и C_2 . Выделение с помощью фильтров определенных спектров собственного излучения пламени является основой спектрозональной регистрации. Длины волн излучения промежуточных продуктов реакций (возбужденных радикалов СН*, ОН* и C_2^*) выбраны с учетом короткого времени жизни возбужденных состояний по сравнению с характерным временем газодинамических процессов. Эти радикалы являются метками химических реакций, и их излучение несет информацию об интенсивности протекания и положении зон реакций. По интенсивности излучения на длинах волн радикалов СН*, C_2^* и ОН* можно определять локальное значение коэффициента избытка окислителя [9, 10], а распределение интенсивности излучения радикалов СН* вдоль факела коррелирует с функцией тепловыделения, интеграл которой характеризует полноту сгорания [11]. Для спектрозональной регистрации применялась камера Imager Intense CCD (пространственное разрешение 1376×1040 пикселей, частота съемки 9.4 Гц, время экспозиции 1 мс) с усилителем изображения Intensified Relay Optics (IRO, LaVision). Излучение радикалов ОН ($\lambda = 307$ нм), СН ($\lambda = 430$ нм), C_2 ($\lambda = 540$ и 560 нм) выделялось с помощью соответствующих интерференционных фильтров. Спектрозональные снимки обрабатывались с применением программного комплекса DaVis.

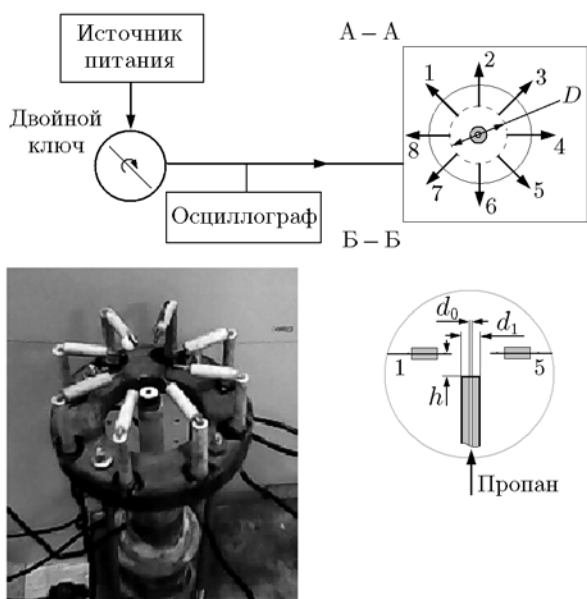


Рис. 1. Схема эксперимента

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ МЕТОДОМ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ

В основе применяемого метода эмиссионной томографии лежит предположение, что коэффициент эмиссии прямо пропорционален плотности излучающих молекул. Изображения и соответствующие им цифровые матрицы

в томографической терминологии называются проекционными данными. Для обработки выбран режим ламинарного диффузионного пламени пропана.

Рассматривалось пламя с цилиндрической симметрией относительно оси потока, поэтому для реконструкции пространственных параметров достаточно результатов измерения с одного ракурса наблюдения. Для решения использовался алгоритм реконструкции на основе метода максимума энтропии, аналогичный примененному в [12].

Было проведено восстановление пространственного распределения интенсивности излучения возбужденных радикалов ОН, СН и С₂ в ламинарном диффузионном пламени при отсутствии внешних воздействий. На рис. 2 представлены профили интенсивности излучения промежуточных продуктов горения в среднем сечении пламени ($u = 3$, $d = 2$ мм, $Re = 1600$) без ЭП. Восстановленные профили адекватно отражают распределение концентраций в диффузионном факеле: на внешней стороне фронта горения, в зоне подмешивания окислителя, преобладает радикал ОН, ближе к области чистого топлива — С₂, промежуточное положение (по максимальному значению концентрации) занимает СН. Положения максимумов интенсивности излучения разнесены, в отличие от гомогенного пламени, где они совпадают [12]. Метод эмиссионной томографии корректно восстанавливает распределение интенсивности излучения в диффузионном факеле и может при-

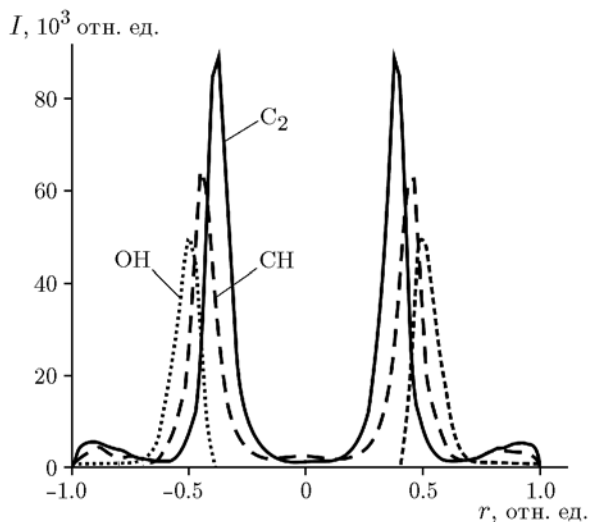


Рис. 2. Восстановленные профили интенсивности свечения

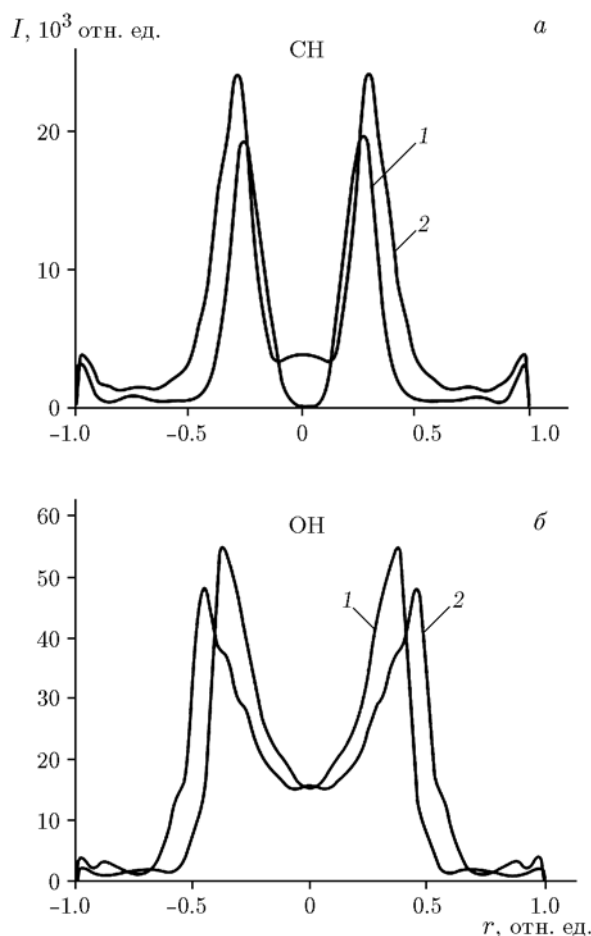


Рис. 3. Восстановленные осредненные по времени профили интенсивности свечения:

1 — без ЭП, 2 — с вращающимся ЭП

меняться при анализе данных спектрозональной регистрации. На рис. 3 представлен пример восстановления профилей интенсивности излучения I на длинах волн радикалов СН и ОН по осредненным спектрозональным снимкам при наличии вращения ЭП. В случае сохранения (после осреднения) аксиальной симметрии при воздействии ЭП на пламя достаточно одного ракурса съемки, но при этом значительно увеличивается уровень шума. Наблюдаемое уширение пламени свидетельствует об интенсификации процессов смешения.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ И ИХ АНАЛИЗ

При подаче напряжения пламя отклонялось к отрицательному электроду. Последовательное переключение электродов по кругу вы-

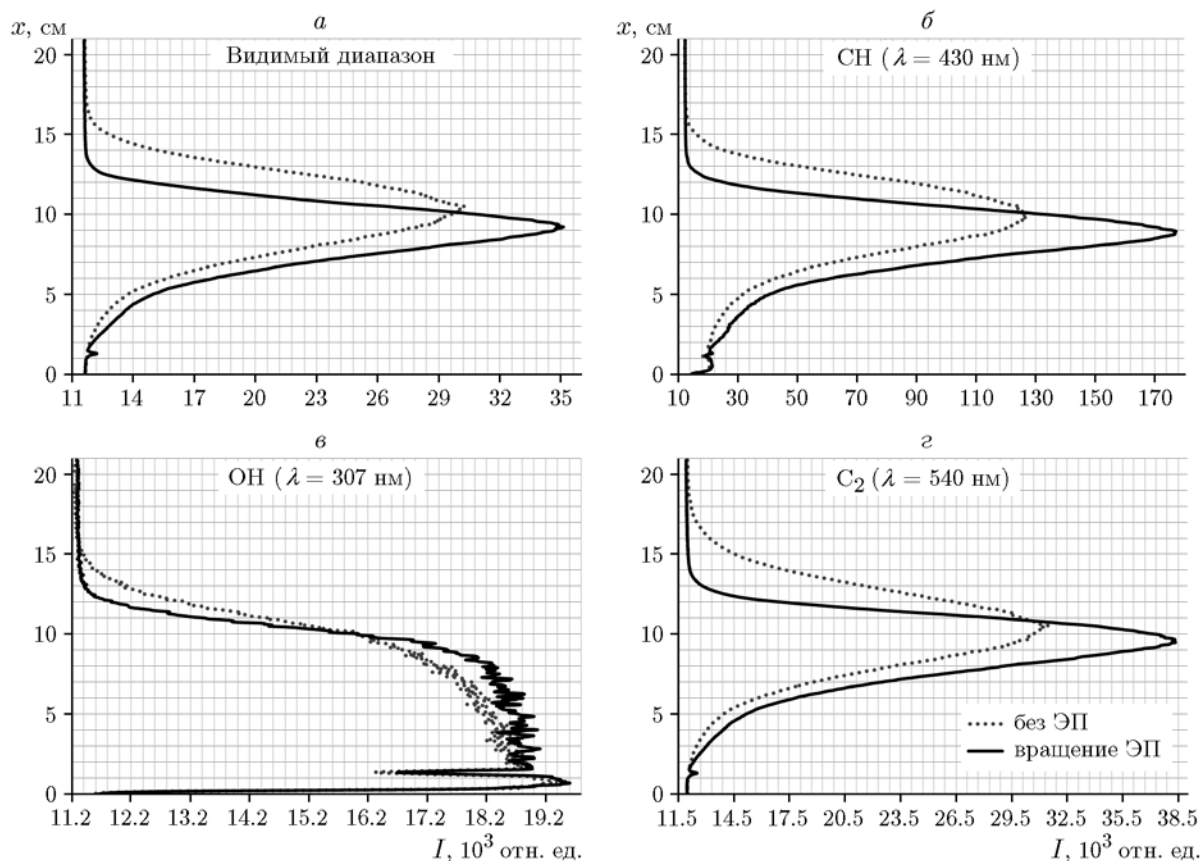


Рис. 4. Интенсивность собственного свечения пламени вдоль факела

зывало вращение пламени вокруг оси струи, частота переключения в опытах 10 Гц. Исследовался ламинарный режим горения с присоединением факела на устье горелки. Полученные распределения интенсивности излучения на длинах волн радикалов OH, CH и C₂ вдоль факела (координатах) приведены на рис. 4. Во всех случаях при воздействии ЭП наблюдаемая длина пламени уменьшается. Максимум в распределении интенсивности излучения смещается к устью горелки, кроме излучения на длине волны радикала OH — в этом случае он находится непосредственно на срезе горелки. Относительное изменение длины факела составляет $\Delta L/L_0 = 18 \div 20$ %, где L_0 — длина факела без ЭП, L — при вращающемся ЭП, $\Delta L = L_0 - L$. Относительное смещение максимума в распределении интенсивности $\Delta L_{\max}/L_{\max 0} = 10 \div 15$ %, $\Delta L_{\max} = L_{\max 0} - L_{\max}$, где $L_{\max 0}$ — положение максимума без ЭП, L_{\max} — с ЭП. Увеличение максимума интенсивности достигает $\Delta I_{\max}/I_{\max 0} \approx 30$ %, где $\Delta I = I_{\max} - I_{\max 0}$, I_{\max} — интенсив-

ность в максимуме с ЭП, $I_{\max 0}$ — без ЭП (в условных единицах). Представленные данные свидетельствуют о сокращении зоны тепловыделения (длины факела) за счет интенсификации процесса смешения. Следует отметить, что полный интеграл интенсивности излучения на длине волны радикала CH сохранился при включении/выключении вращения ЭП и был равен значению без ЭП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод эмиссионной томографии, основанный на методе максимума энтропии, корректно восстанавливает распределение излучения в диффузионном факеле и может применяться при анализе данных спектральной регистрации. В случае сохранения аксиальной симметрии при воздействии ЭП на пламя достаточно одного ракурса съемки. Наблюдаемое уширение пламени свидетельствует об интенсификации процессов смешения.

Анализ данных спектральной регистрации свечения пламени показал уменьше-

ние длины факела на $18 \div 20\%$ за счет интенсификации процесса смешения топлива и окислителя под воздействием вращающегося ЭП. При этом полный интеграл интенсивности излучения на длине волны радикалов CH , C_2 и OH сохранялся при включении/выключении вращения ЭП и был равен значению без ЭП.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Goodings J. M., Bohme D. K., Chun-Wai N. G.** Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. I. Positive ions // *Combust. Flame.* — 1979. — V. 36. — P. 27–43.
2. **Rodrigues J. M., Agneray A., Jaffr'ezic X., Bellenoue M., Labuda S., Leys C., Chernukho A. P., Migoun A. N., Cenian A., Savelev A. M., Titova N. S., Starik A. M.** Evolution of charged species in propane/air flames: mass-spectrometric analysis and modeling // *Plasma Sources Sci. Technol.* — 2007. — V. 16. — P. 161–172.
3. **Лаутон Дж., Вайнберг Ф.** Электрические аспекты горения. — М.: Энергия, 1976.
4. **Третьяков П. К., Тупикин А. В., Денисова Н. В., Ганеев О. В., Замашиков В. В., Козорезов Ю. С.** Ламинарное пропановоздушное пламя в слабом электрическом поле // *Физика горения и взрыва.* — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 9–14.
5. **System** and apparatus for applying an electric field to a combustion volume: Pat. US 2011/0027734 / Hartwick T. S., Goodson D., Rutkowski R. F., Osler G., Wiklof Ch. A.
6. **Dolmansley T. J. C., Wilson Ch. W., Stone D. A.** Electrical modification of combustion and the affect of electrode geometry on the field produced // *Modell. Simul. Eng.* — 2011. — Article ID 676428. — <http://dx.doi.org/10.1155/2011/676428>.
7. **Belhi M., Domingo P., Vervisch P.** Effect of electric field on flame stability // *Proc. of the 4th European Combustion Meeting.* — Vienna, 2009. — P. 1–6.
8. **Kim M. K., Kim H. H., Chung S. H.** Effect of ac electric fields on the stabilization of premixed bunsen flames // *33rd Intern. Symp. on Combustion, Beijing, China, 2010.*
9. **Muruganandam T. M., Kim B., Olsen R., Patel M., Romig B., Seitzman J. M.** Chemiluminescence based sensors for turbine engines // *AIAA Paper 2003-4490.* — 2003. — (39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf., Huntsville, AL, July 20–23, 2003).
10. **Kojima J., Ikeda Y., Nakajima T.** Basic aspects of $\text{OH}(\text{A})$, $\text{CH}(\text{A})$, and $\text{C}_2(\text{d})$ chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane — air premixed flames // *Combust. Flame.* — 2005. — V. 140. — P. 34–45.
11. **Nori V. N., Seitzman J. M.** CH^* chemiluminescence modeling for combustion diagnostics // *Proc. Combust. Inst.* — 2009. — V. 32. — P. 895–903.
12. **Denisova N., Tretyakov P., Tupikin A.** Emission tomography in flame diagnostics // *Combust. Flame.* — 2013. — V. 160, N 3. — P. 577–588.

Поступила в редакцию 12/II 2015 г.
