

УДК 53.097

В.С. Козулин<sup>1,2</sup>, П.К. Третьяков<sup>1</sup>, А.В. Тупикин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
Россия, 630090, Новосибирск, Институтская ул., 4/1, E-mail: tupikin@itam.nsc.ru*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, Россия,  
630090, Новосибирск, Пирогова ул., 2, E-mail: vovaninsert@rambler.ru*

## СПЕКТРОЗОНАЛЬНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ ПРОПАНА ВО ВНЕШНЕМ НЕСТАЦИОНАРНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

### АННОТАЦИЯ

Электрическое поле (ЭП) – эффективное средство воздействия на пламя, т.к. в зоне реакции присутствует ионизованная среда. В данной работе исследуется влияние слабых ЭП ( $U_1 = 1300$  В) изменяемой пространственной конфигурации на диффузионное горение пропана в режиме присоединённого и поднятого пламени (в сопле горелки  $Re = 400 \div 7000$ ). Для проведения эксперимента разработана и создана схема, задающая вращение вектора напряжённости ЭП. Спектрозональная регистрация собственного излучения пламени на длинах волн возбуждённых радикалов ( $OH^*$ ,  $CH^*$ ,  $C_2^*$ ) позволила получить информацию о влиянии ЭП на протекающие процессы. После обработки данных, полученных в результате съёмки, построено распределение интегральной интенсивности излучения радикалов по высоте диффузионного факела и проведено их сравнение при включенном и выключенном ЭП. Обнаружено, что вращение вектора напряжённости ЭП приводит к увеличению максимума интенсивности излучения радикалов  $CH^*$  и  $C_2^*$  и его смещению вниз по высоте факела, к устью горелки, при этом протяжённость излучающей зоны уменьшается при рассмотрении всех выбранных для исследования радикалов. Всё это свидетельствует об интенсификации процесса горения при воздействии ЭП заданной конфигурации. При исследовании поднятого пламени с использованием спектрозональной съёмки на длинах волн возбуждённых радикалов  $OH^*$  и  $CH^*$  в области стабилизации пламени определён локальный коэффициент избытка окислителя  $\alpha$ .

ДИФФУЗИОННОЕ ПЛАМЯ, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, СПЕКТРОЗОНАЛЬНАЯ СЪЁМКА,  
РАДИКАЛЫ  $OH^*$ ,  $CH^*$ ,  $C_2^*$

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, с каждым годом всё более актуальной становится проблема дефицита природных энергоресурсов, связанная с их исчерпаемостью и невозобновляемостью. Кроме того, не стоит забывать об угрозе благополучию окружающей среды при использовании объектов энергетики: выброс вредных веществ в атмосферу при сжигании органического топлива. Основными способами решения данных проблем являются энергосбережение и повышение энергоэффективности в различных областях мировой энергетики [1].

Широкая область применения различных видов горения в промышленности, технике, транспорте и т.д. с использованием углеводородных топлив (как известно, исчерпаемых и

невозобновляемых) создают предпосылки для детального изучения процессов горения и разработки новых технологий, позволяющих использовать имеющиеся ресурсы более эффективно. Таким образом, имеет место актуальность задач, связанных с оптимизацией процессов горения топлива и повышением КПД энергетических агрегатов, совершенствованием уже известных и созданием новых методов позволяющих улучшить процессы сжигания.

Наличие в пламени высокой концентрации ионов ( $10^9 - 10^{12} \text{ см}^{-3}$  [2]), максимум которой в случае диффузионного горения соответствует фронту в основании пламени [3], даёт возможность воздействовать на него ЭП. В результате диффузионного разделения зарядов возникает внутреннее ЭП пламени. При наложении слабого внешнего ЭП результирующее поле распределено неравномерно, и возникает газодинамический эффект, являющийся одним из проявлений влияния ЭП на пламя, – «ионный ветер»: «при одинаковых размерах зон с положительным и отрицательным зарядами преобладают силы, действующие на первую из них в сторону отрицательного электрода, и в этой области газодинамические характеристики течения изменяются больше, чем в других областях» [2].

Следовательно, наряду с такими методами, как воздействие акустических колебаний, применение катализаторов, газодинамическое воздействие и т.п., применение внешнего электрического поля является перспективным методом управления пламенем. В этой области работали многие отечественные (А.Э. Малиновский, Н.Н. Семенов, Е.М. Степанов, Б.Г. Дьячков и др.) и зарубежные авторы (Н.Ф. Calcote, R.N. Pease, J. Lawton, F. Weinberg и др.), установлены определённые закономерности воздействия ЭП на различные виды пламен. Однако никто не рассматривал влияние ЭП с изменяемой во времени конфигурацией на горение.

## Цель работы

Целью данной работы является исследование влияния вращения вектора напряженности ЭП на диффузионное горение пропана.

## Схема эксперимента

Объектом исследования в данной работе является диффузионное пламя пропана. Сопло горелочного устройства изготовлено из диэлектрика, внутренний диаметр – 1 мм. Исследования проводились при стабилизации пламени на кромке сопла и в режиме поднятого пламени (в сопле горелки  $Re = 400 \div 7000$ ).

Для воздействия ЭП на пламя была разработана и создана схема наложения ЭП и рассчитаны характеристики необходимых элементов для обеспечения безопасности и стабильности получаемого эффекта (рис. 1). Наличие в схеме резистивного делителя напряжения предотвращает возникновение короткого замыкания в случае пробоя промежутка между электродами в присутствии пламени.

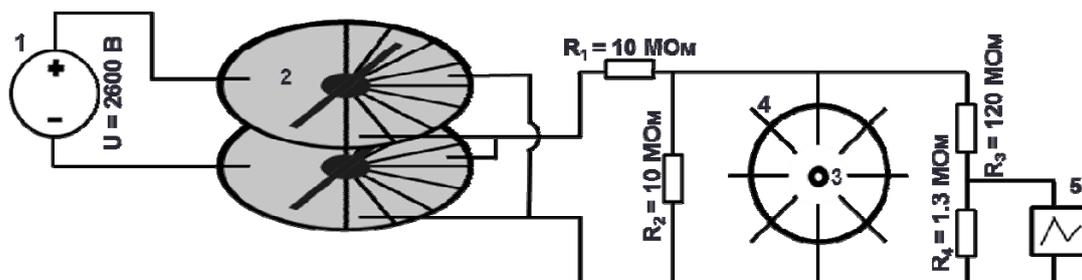


Рис. 1. Схема установки: 1 – источник питания, 2 – двойной ключ, 3 – сопло диффузионной горелки, 4 – электроды, 5 – осциллограф Tektronix TDS 2014

Схема включает 8 тонких цилиндрических электродов из нержавеющей стали (диаметр 1 мм), с возможностью регулирования высоты  $h$  над срезом сопла (рис. 2, эксперименты проведены при  $h = 10,5$  мм и 17 мм).

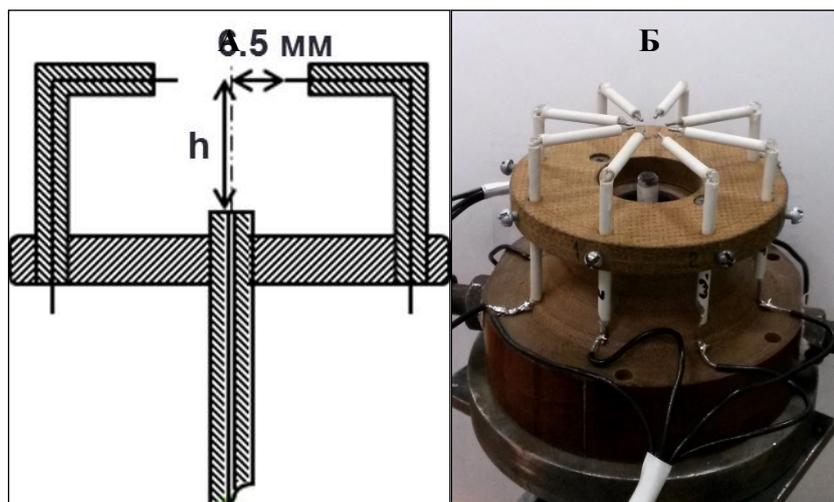


Рис. 2. А – относительное расположение сопла и электродов (вид сбоку), Б – фото

В схеме задействован высоковольтный источник постоянного напряжения ВРПИТ – 250 – 0,4 с рабочим напряжением  $U = 2600$  В. Разность потенциалов на противоположных электродах с учётом делителя, необходимая для проведения эксперимента  $U_1 = 1300$  В.

Напряжение ( $U_1$ ) подаётся на противоположные электроды попарно и механически переключается по кругу двойным ключом (приводимым в движение электромотором), создавая тем самым вращение вектора напряжённости ЭП относительно оси топливной струи и увлекая за собой диффузионное пламя. Рабочая частота вращения  $\sim 7$  Гц.

Для подачи и регулирования расхода топлива (бытовой пропан) использовался тепловой регулятор массового расхода серии EL-FLOW Select (с точностью  $\pm 1\%$  от полной шкалы).

## Регистрация пламени

Оптические методы изучения пламён позволяют проводить измерения, не нарушая гидродинамической, электрической, тепловой и химической структуры исследуемой системы. Поэтому отдается предпочтение использованию именно таких методов.

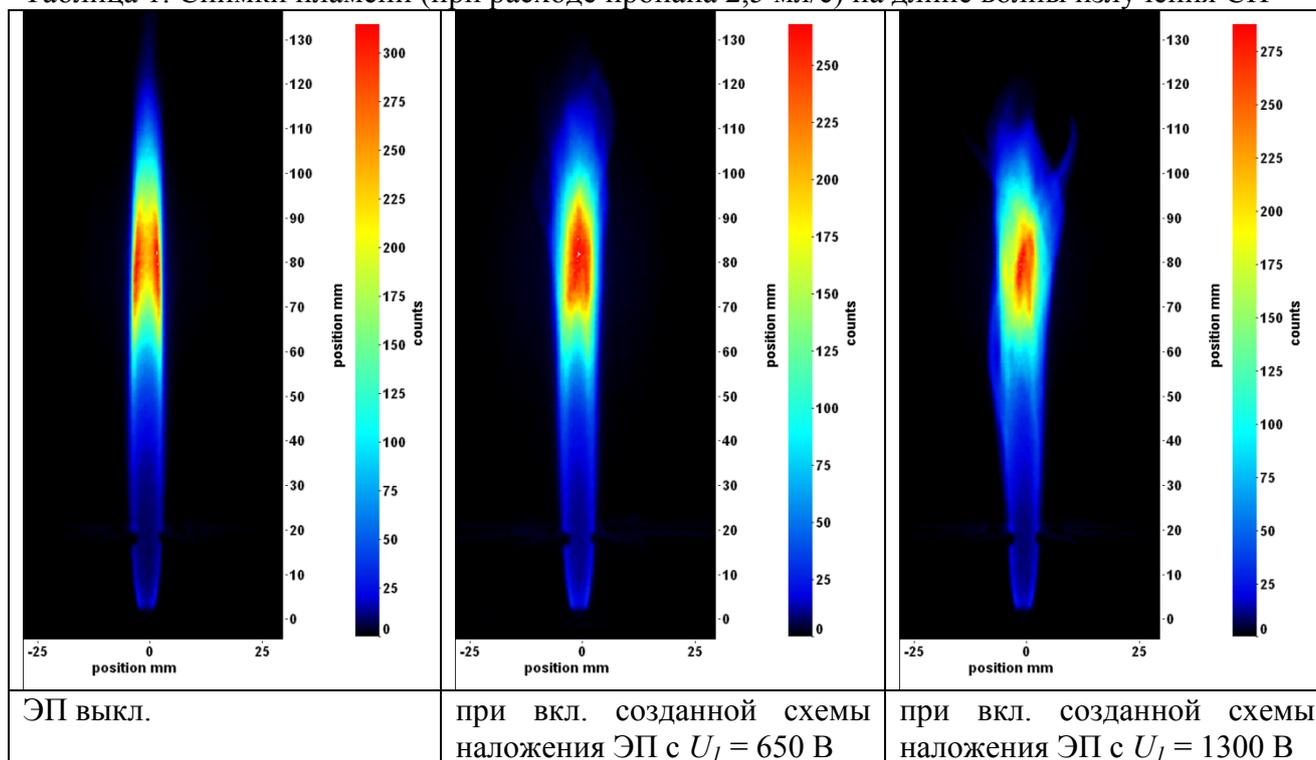
Помимо обычной фото- и видео регистрации пламени с помощью камеры Nikon D5100, в работе применялась спектрозональная регистрация собственного излучения пламени на длинах волн возбуждённых радикалов ( $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$  и  $\text{C}_2^*$  – характерных для пламени углеводородов [4]) с использованием Image Intense CCD камеры (LaVision, 1376 x 1040 пикселей, частота съёмки 9,8 Гц, время экспозиции  $\sim 1$  мс). Совместно с камерой применялся усилитель изображения Intensified Relay Optics (IRO, LaVision). Излучение радикалов  $\text{OH}^*$  ( $\lambda = 307$  нм),  $\text{CH}^*$  ( $\lambda = 430$  нм),  $\text{C}_2^*$  ( $\lambda = 540$  и 560 нм) выделялось соответствующими интерференционными фильтрами.

Оценка газодинамического времени ( $\sim 10^{-2}$  с) и его сравнение с характерными временами высвечивания радикалов ( $\sim 10^{-8} \div 10^{-6}$  с [5]) свидетельствует о том, что «короткоживущие» радикалы являются метками реакции. Это позволяют получить информацию о влиянии ЭП на протекание процесса горения.

Обработка полученных данных проводилась программой DaVis, разработанной LaVision. Получено распределение интегральной интенсивности собственного излучения пламени на длинах волн радикалов  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$  по высоте факела и проведено их

сравнение при выключенном и включенном ЭП. При обработке серий снимков в программе выполнялось осреднение данных 30 кадров (табл. 1).

Таблица 1. Снимки пламени (при расходе пропана 2,5 мл/с) на длине волны излучения  $\text{CH}^*$



## Результаты

### Стабилизация на кромке сопла (присоединённое пламя)

В режиме стабилизации пламени на кромке сопла проведена серия экспериментов при различных скоростях истечения пропана в затопленное пространство (от 1,7 м/с до 5,6 м/с). Вращение вектора напряжённости ЭП, задаваемое с помощью созданной схемы (рис. 1), при высоте уровня электродов  $h = 10,5$  мм ведёт к возрастанию максимума в распределении интенсивности излучения радикала  $\text{CH}^*$  на 30% и его смещению к устью горелки на 10 – 15% от первоначального положения (рис. 3), при этом уменьшается общая протяженность излучающей на этой длине волны зоны. Аналогичное поведение наблюдается и при рассмотрении излучения  $\text{C}_2^*$  как при  $\lambda = 540$  нм (рис. 4), так и при  $\lambda = 560$  нм.

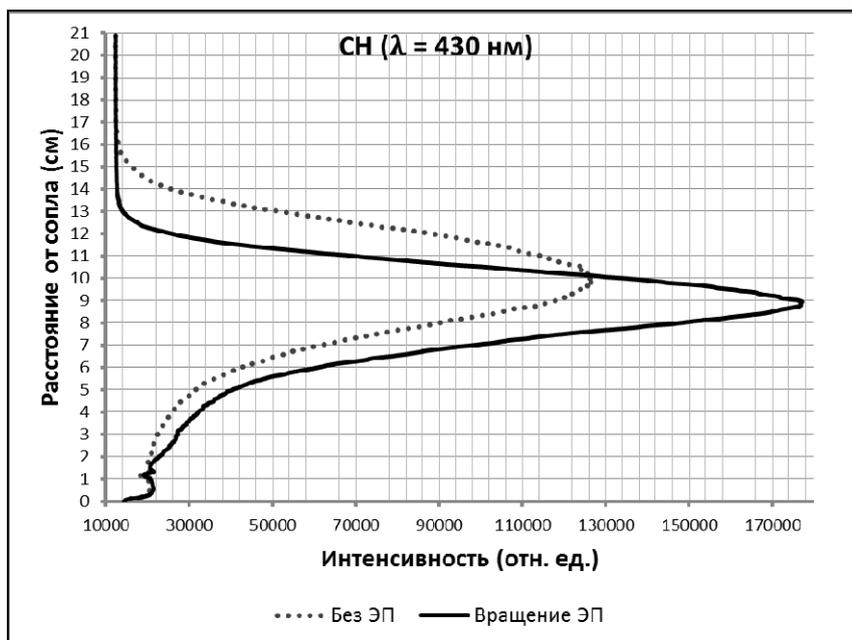


Рис. 3. Распределение интегральной интенсивности излучения по высоте факела при выкл. и включенном ЭП ( $U_I = 1300$  В,  $h = 10,5$  мм)

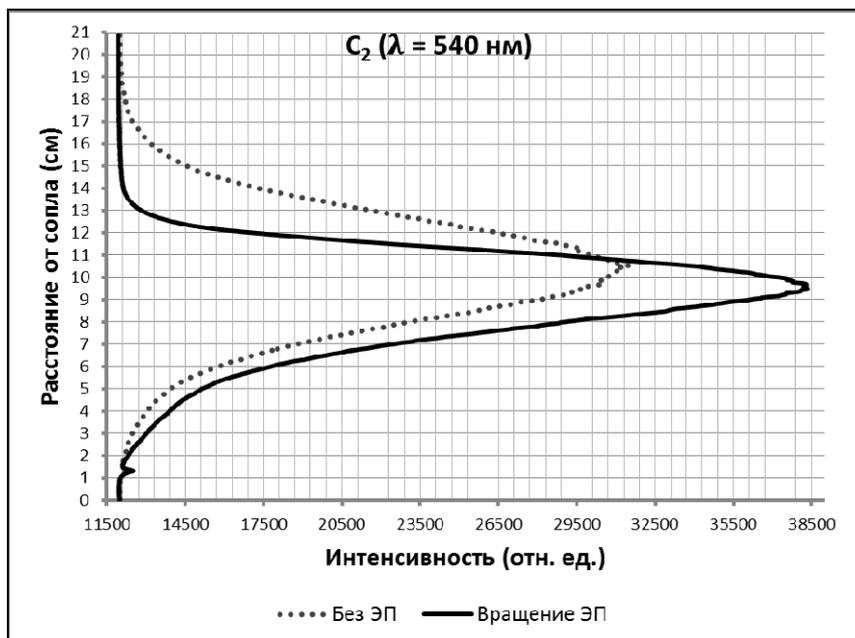


Рис. 4. Распределение интегральной интенсивности излучения по высоте факела при выкл. и включенном ЭП ( $U_I = 1300$  В,  $h = 10,5$  мм)

Сокращение зоны свечения при вращении вектора напряжённости ЭП также замечено на длине волны излучения радикала  $\text{OH}^*$ , максимум интенсивности для которого находится на срезе горелки и остаётся неизменным (рис. 5). Значение интеграла распределения интенсивности излучения радикалов  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$  и  $\text{C}_2^*$  сохраняется при воздействии ЭП.

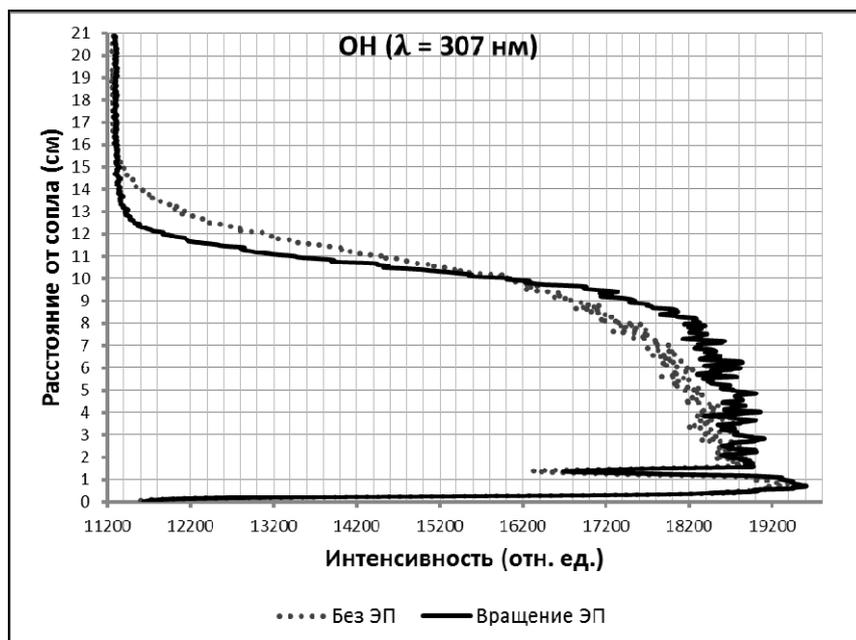


Рис. 5. Распределение интегральной интенсивности излучения по высоте факела при выкл. и включенном ЭП ( $U_I = 1300$  В,  $h = 10,5$  мм)

Следует отметить тот факт, что при использовании той же самой схемы наложения ЭП, но с большим значением высоты уровня электродов ( $h = 17$  мм), возрастает максимум интенсивности излучения, однако не наблюдается его смещения к устью сопла (для  $\text{CH}^*$ ) и не уменьшается общая протяжённость излучающей зоны (интеграл распределения интенсивности излучения не сохраняется), как это было при  $h = 10,5$  мм для  $\text{CH}^*$  и  $\text{OH}^*$  (распределение для  $\text{CH}^*$  при  $h = 17$  мм на рис. 6). Таким образом, косвенно подтверждается то, что максимум ионизации диффузионного пламени находится в его основании согласно работе [3]. Кроме того, согласно авторам статьи [6] Orain и Hardalupas, при горении пропана распределение интенсивности излучения радикала  $\text{CH}^*$  пропорционально скорости тепловыделения, интеграл от которой даёт изменение полноты сгорания по длине факела.

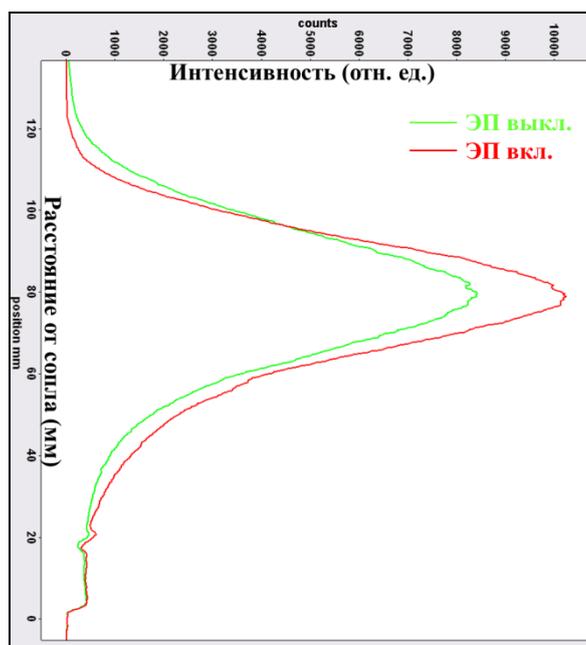


Рис. 6. Распределение интегральной интенсивности излучения  $\text{CH}^*$  по высоте факела при выкл. и включенном ЭП ( $U_I = 1300$  В,  $h = 17$  мм)

### Поднятое пламя

Воздействие изменяющейся пространственной конфигурации ЭП на поднятое пламя приводит к стабилизации пламени в плоскости электродов, расширяя тем самым диапазон стабилизации по скорости истечения топлива. Спектрональная съёмка показала, что под влиянием внешнего ЭП возрастает интенсивность излучения возбуждённых радикалов  $\text{CH}^*$  и  $\text{OH}^*$ , наблюдаемых в области стабилизации (для  $\text{OH}^*$  на рис. 7). Как и в случае присоединённого пламени (при  $h = 17$  мм) интеграл распределения интенсивности не сохраняется, что позволяет говорить об изменении полноты сгорания топлива.

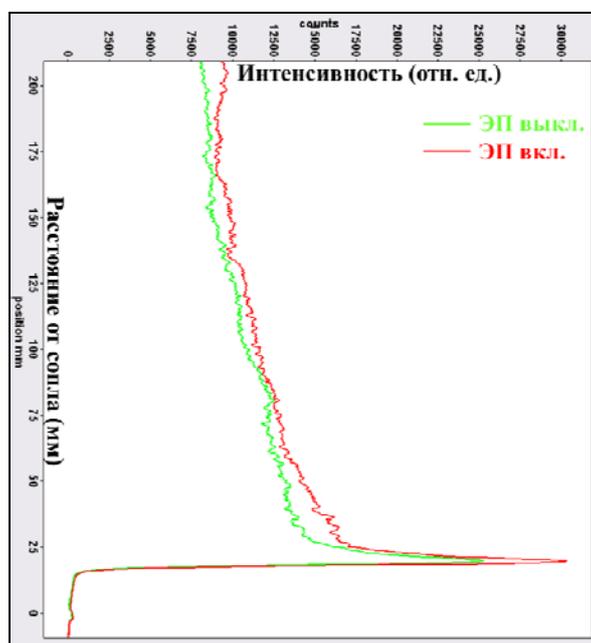


Рис. 7. Распределение интегральной интенсивности излучения  $\text{OH}^*$  по высоте пламени вблизи области стабилизации при выкл. и включенном ЭП ( $U_l = 1300$  В,  $h = 17$  мм)

Известно, что в точках поджога (в которых выполняется условие стабилизации поднятого пламени) состав горючей смеси несколько более богат, чем стехиометрический [7], т.е. коэффициент избытка окислителя  $\alpha$  чуть меньше единицы.

Обычно величину  $\alpha$  сопоставляют с отношением интенсивностей полос  $\text{OH}$  и  $\text{CH}$ . Так авторы Orain и Nardalupas [6] предложили определять локальные значения коэффициента избытка окислителя по отношению интенсивностей излучения радикалов  $\text{OH}^*$  и  $\text{CH}^*$ .

Применение спектрональной съёмки позволило оценить значение  $\alpha$  в точках поджога поднятого пламени. После обработки полученных изображений, были получены распределения интегральных интенсивностей излучения радикалов  $\text{OH}^*$  и  $\text{CH}^*$  по высоте факела. Отношение значений интенсивности в области поджога составило 0,98, следовательно, значение локального коэффициента избытка окислителя  $\alpha \approx 0,98$ , что довольно хорошо согласуется с теорией.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом спектрональной регистрации проведено исследование диффузионного пламени пропана под воздействием нестационарного ЭП. Смещение положения максимумов для различных длин волн в распределении интегральной интенсивности собственного излучения пламени свидетельствуют о влиянии ЭП на процессы смешения, об их интенсификации в сравнении с режимом без воздействия ЭП. Кроме того, в результате аналогичных экспериментов с поднятым пламенем, обнаружена возможность стабилизации пламени при вращении вектора напряженности ЭП, позволяющая расширить диапазон критических скоростей устойчивого горения пропана. Для поднятого пламени по

интегральным интенсивностям излучения  $\text{OH}^*$  и  $\text{CN}^*$  определен локальный коэффициент избытка окислителя  $\alpha$ .

## СПОНСОРЫ

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

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$U$  – напряжение на источнике, В;

$R_{1,2,3,4}$  – электрическое сопротивление, МОм;

$U_1$  – напряжение между противоположными электродами, В;

$h$  – высота уровня электродов, мм;

$\lambda$  – длина волны излучения радикала, нм;

$\alpha$  – коэффициент избытка окислителя.

Сокращения:

ЭП – электрическое поле;

выкл. – выключено;

вкл. – включено.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ушаков В.Я.** Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения // Известия Томского политехнического университета, 2011. Т. 319. № 4. С. 5-13.
2. **Лаутон Д.** Электрические аспекты горения / Дж. Лаутон, Ф. Вайнберг; пер. с англ. Н.М. Вентцель, Л.П. Побережского, И.Я. Полонского, под ред. В.А. Попова. – М.: Энергия, 1976. 294 с.
3. **Calcote H.F.** Mechanisms for the formation of ions in flames / H. F. Calcote // Combustion and Flame, 1957. V. 1. № 4. P. 385-403. ISSN 0010-2180.
4. **Гейдон А.** Спектроскопия и теория горения / А. Гейдон; пер. с англ. В.В. Воеводского, под ред. В.Н. Кондратьева. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1950. 308 с.
5. **Гейдон А.** Спектроскопия пламен / А. Гейдон; пер. с англ. И.В. Вейц, Л.В. Гурвича, под ред. Кондратьева В.Н. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959. 383 с.
6. **Orain M.** Effect of fuel type on equivalence ratio measurements using chemiluminescence in premixed flames / M. Orain, Y. Hardalupas // Comptes Rendus Mécanique, 2010. V. 338. № 5. P. 241-254. – ISSN 1631-0721.
7. **Баев В.К.** Исследование устойчивости диффузионного пламени / В.К. Баев, В.А. Ясаков // Изв. Сиб. отд. АН СССР / СО АН СССР, 1969. С. 38-42. (Серия "Технические науки", ISSN 0134-24280002-3434; № 3, вып. 1).

V.S. Kozulin<sup>1,2</sup>, P.K. Tretyakov<sup>1</sup>, A.V. Tupikin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Russia,  
630090, Novosibirsk, Institutskaya st., 4/1, E-mail: tupikin@itam.nsc.ru*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State University, Russia,  
630090, Novosibirsk, Pirogova st., 2, E-mail: vovaninsert@rambler.ru*

## **SPECTROZONAL PHOTOGRAPHY OF PROPANE DIFFUSION FLAME SUBJECTED THE NON-STATIONARY ELECTRIC FIELD**

An electric field (EF) is the effective means for effect on a flame because there is ionized medium in a reaction zone. In this paper we investigate the effect of variable spatial configuration of the weak EF ( $U_1 = 1300$  V) on diffusion combustion of propane in a nozzle-attached and lift-off flame mode (in a burner nozzle  $Re = 400 \div 7000$ ). For the experiment the scheme set a rotation of an intensity vector of the EF was designed and constructed. Spectrozoal photography of own flame radiation at the wavelengths of excited radicals ( $OH^*$ ,  $CH^*$ ,  $C_2^*$ ) provides information about the EF effect on processes took place. After processing of the data obtained as a result of the shooting, a radical radiation intensity distribution along a diffusion torch was plotted and compared with and without the EF effect. It is found that the rotation of the intensity vector of the EF leads to a growth of a maximum emission intensity of radicals  $CH^*$  and  $C_2^*$  and its shift down the torch height to the burner mouth, at the same time the length of the radiating area decreases considering all radicals selected for the investigation. All this testifies to the intensification of the burning process exposed to the preset EF configuration. The research of the flame using spectrozoal photography at the wavelengths of excited radicals  $OH^*$  and  $CH^*$  in a flame stabilization area allow to determine a local air-fuel equivalence ratio  $\alpha$ .

DIFFUSION FLAME, ELECTRIC FIELD, SPECTROZONAL PHOTOGRAPHY, RADICALS  
 $OH^*$ ,  $CH^*$ ,  $C_2^*$