

УДК 536.46

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ДИФФУЗИОННОГО ПОДНЯТОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ ВНЕШНИМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

А. В. Тупикин, П. К. Третьяков, В. С. Венедиктов

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

Представлены результаты исследования периодического воздействия слабого электрического поля (ЭП) на диффузионное горение газообразных углеводородов. Основное внимание направлено на изучение влияния параметров ЭП на стабилизацию пламени. Рассмотрено два типа полей: с импульсно-периодическим изменением напряженности во времени при постоянной конфигурации силовых линий (импульсно-периодическое ЭП) и с изменением конфигурации во времени при сохранении модуля напряженности (ЭП с изменяемой во времени конфигурацией). Применялась прямая фото- и видеорегистрация, а также спектроскопическая съемка собственного свечения пламени (на длинах волн излучения возбужденных радикалов  $\text{OH}^*$  и  $\text{CH}^*$ ). Показано, что область стабилизации пламени (точки поджога) стремится в место наибольшей напряженности ЭП. Воздействие на горение ЭП с изменяемой во времени конфигурацией приводит к стабилизации пламени в плоскости электродов и локальной интенсификации горения.

Ключевые слова: диффузионное горение, поднятое пламя, электрическое поле, спектроскопическая съемка, интегральное излучение.

DOI 10.15372/FGV20170105

### ВВЕДЕНИЕ

Обусловленные хемоионизацией электрические свойства углеводородного пламени (высокая концентрация заряженных частиц  $10^9 \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$  [1]) позволяют воздействовать на него внешним электрическим полем (ЭП). Отрицательными заряженными частицами являются в основном электроны, а положительными — ионы. Самым распространенным ионом является  $\text{H}_3\text{O}^+$ , концентрация которого сопоставима с концентрацией электронов. Из-за различия в подвижности зарядов возникает неравенство гидродинамических сил, действующих на область горения, вследствие чего возможно изменение формы пламени, скорости его распространения и процессов тепло- и массопереноса [2].

В настоящее время воздействие ЭП на горение исследуется в широком диапазоне направлений: это управление процессом в круп-

ногабаритных устройствах по сжиганию биотоплив [3]; использование микрокамер горения для повышения производительности процесса [4]; контроль акустических возмущений пламени [5] и т. д. При этом, как правило, рассматриваются постоянные ЭП и иногда — переменные, но во всех случаях конфигурация силовых линий внешнего поля не меняется во времени. Однако воздействие ЭП на фронт пламени в значительной степени зависит от конфигурации силовых линий и его временных характеристик [6–8]. Например, воздействие импульсно-периодического поля может приводить к более значительным изменениям формы пламени, чем постоянное ЭП той же напряженности [8]. Влияние ЭП с изменяемой во времени конфигурацией на присоединенный диффузионный факел изучалось в [9], а именно было показано, что наличие такого ЭП ведет к интенсификации процессов смешения и, как следствие, к улучшению горения (уменьшению длины факела).

В данной работе основное внимание уделено условиям стабилизации поднятого диффузионного пламени при воздействии периодическим ЭП. Рассмотрено два типа полей: импульсно-периодическое изменение на-

Работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований СО РАН (проект III.22.6.24, регистрационный номер 01201351870), при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-01-00255-а).

© Тупикин А. В., Третьяков П. К., Венедиктов В. С., 2017.

пряженности во времени при неизменной конфигурации силовых линий и изменение конфигурации во времени при постоянной напряженности ЭП.

### ПЛАМЯ В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

При размещении факела между пластинами (рис. 1) включение напряжения приводит к отклонению пламени в сторону отрицательного электрода. Опыты проводились с применением в качестве топлива пропана (бытовая пропан-бутановая смесь). Топливная струя истекала из сопла диаметром 2.3 мм в атмосферу со скоростями  $u_0 = 11.5$  и  $15$  м/с. Прикладываемое к электродам напряжение изменялось в диапазоне  $U = 0 \div 4.5$  кВ. На рис. 2 приведены данные о влиянии напряжения и частоты следования электрических импульсов на среднюю величину подъема (отрыва) пламени — расстояние от среза горелки до места стабилизации (точек поджога). Необходимо отметить, что точки поджога совершают колебания, амплитуда которых зависит от скорости истечения топливной струи [10]. Осреднение высоты подъема пламени проводилось по 10 случайным измерениям, среднеквадратическое отклонение от среднего значения составляло  $5 \div 10$  %. С увеличением частоты следования электриче-

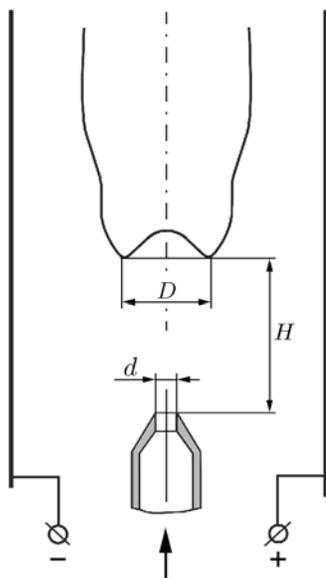


Рис. 1. Схема эксперимента с импульсно-периодическим ЭП

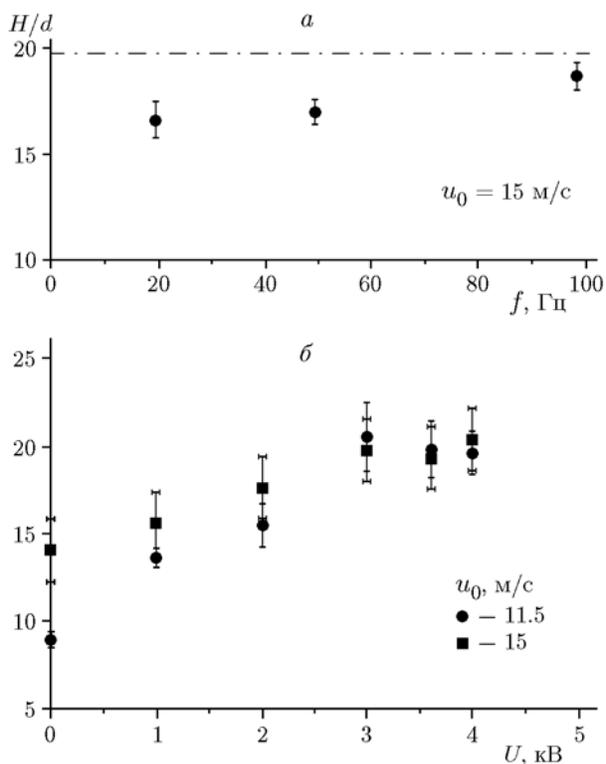


Рис. 2. Безразмерная высота подъема факела: а — в зависимости от частоты импульсов ( $U = 3.8$  кВ), б — в зависимости от напряжения

ских импульсов область стабилизации пламени стремится к положению, которое она занимает при постоянном ЭП той же напряженности (рис. 2,а,  $U = 3$  кВ). С ростом прикладываемого напряжения точки поджога поднимаются, но не выше середины пластин (рис. 2,б). Поле между пластинами не является однородным из-за конечных размеров пластин, при этом напряженность ЭП достигает максимума по их центру. Таким образом, область стабилизации пламени стремится в место с наибольшей напряженностью ЭП.

### СТАБИЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ВО ВРЕМЕНИ КОНФИГУРАЦИЕЙ

Экспериментальная схема для изучения воздействия на диффузионное горение ЭП с изменяемой во времени конфигурацией силовых линий представлена на рис. 3. Вокруг диэлектрического сопла (его внутренний диаметр 1 мм (для пропана) и 1.5 мм (для метана)) расположено восемь тонких электродов на высоте 18 мм. Расстояние между противоположны-

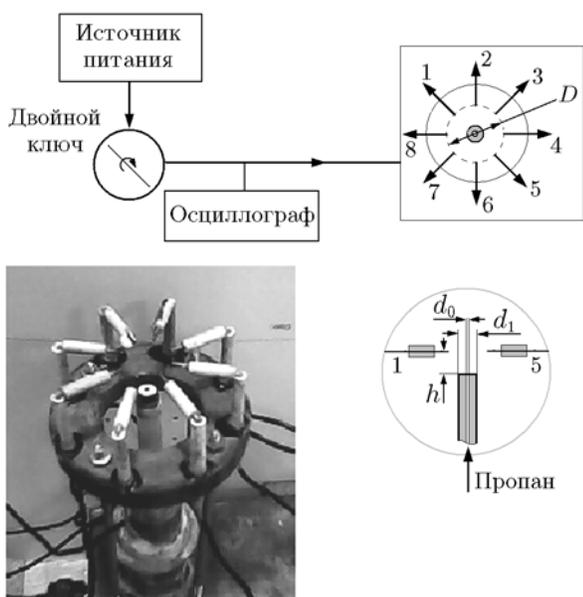


Рис. 3. Схема эксперимента со стабилизацией ЭП с изменяемой во времени конфигурацией силовых линий

ми электродами 13 мм, прикладываемое между ними напряжение 1.3 кВ. Напряжение подается на противоположные электроды попарно и переключается по кругу. Таким образом, задается вращение вектора напряженности ЭП (частота вращения 7 Гц) относительно оси топливной струи, при этом создаваемое ЭП увлекает за собой диффузионное пламя. В экспериментах режим поднятого пламени реализовывался в диапазоне скоростей истечения топливной струи (от присоединения на кромку горелки до срыва пламени) от  $10.4 \pm 0.6$  до  $29.4 \pm 0.6$  м/с для пропана и от  $14.2 \pm 0.6$  до  $27.1 \pm 0.6$  м/с для метана.

Регистрация формы пламени велась камерой High Speed Star 3 (LaVision) с разрешением  $1024 \times 1024$  пиксел и частотой кадров 60 Гц. Обработка полученных снимков проводилась в программе DaVis (LaVision), при этом высота поднятия пламени определялась после осреднения результатов по 100 кадрам с погрешностью не более 5 %.

В диффузионных пламенах горючих газов (в том числе углеводородов) для безразмерной высоты поднятия пламени существует функциональная связь:  $H/d = f(\rho_T/\rho_{ок}, \text{Но})$ , где  $\rho_T$  — плотность топлива,  $\rho_{ок}$  — плотность окислителя, Но — критерий гомохронности (отношение характерных времен горения  $\tau_{гор}$  и течения

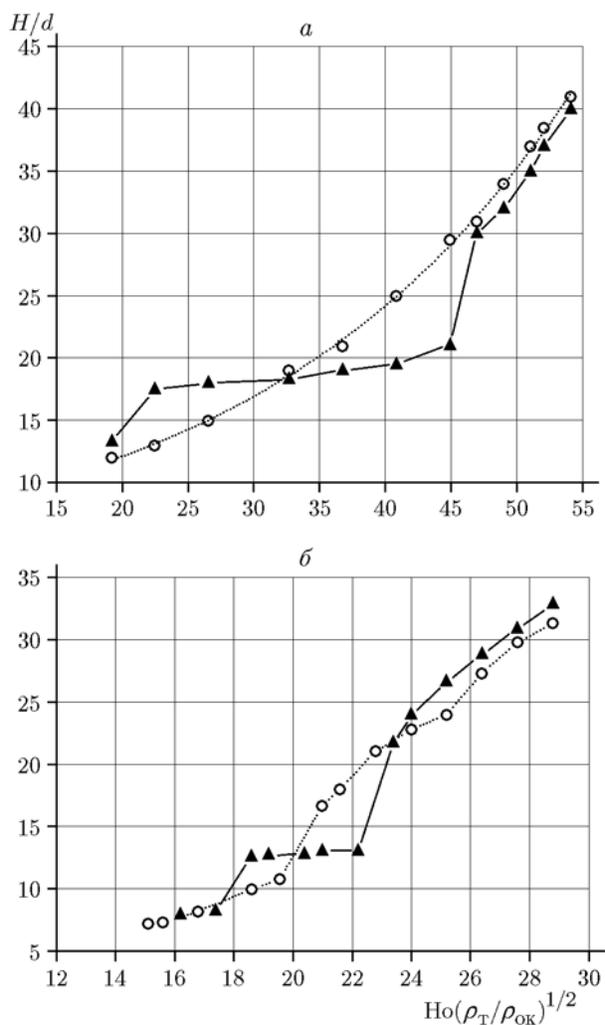


Рис. 4. Зависимость безразмерной высоты подъема факела пропана (а) и метана (б) от критерия гомохронности и отношения плотностей топлива и окислителя:

▲ — с воздействием ЭП, ○ — без воздействия ЭП

$\tau_{теч}$ ,  $\text{Но} = \tau_{гор}/\tau_{теч} = u_0\tau_{гор}/d$ ) [10]. Экспериментально полученная зависимость безразмерной высоты поднятия пламени от критерия гомохронности для пропана и метана при воздействии ЭП и без него представлена на рис. 4.

Подача напряжения по заданной схеме приводит к смещению области стабилизации (точек поджога) в плоскость электродов и сохранению такого положения при изменении скорости истечения топлива в некотором диапазоне расходов. Об этом свидетельствуют участки с постоянной высотой подъема ( $H/d \approx \text{const}$ ) на графиках рис. 4, соответствующих условиям с воздействием ЭП на горение. Кро-

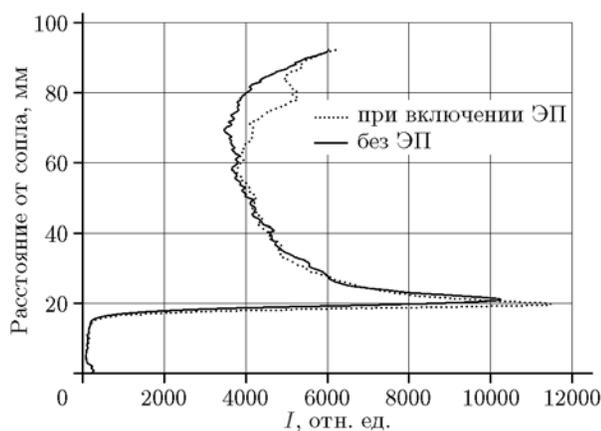


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения радикала  $\text{CH}^*$  по высоте пламени пропана (скорость истечения пропана 18 м/с)

ме того, при включении ЭП можно увеличить скорость топлива выше значения скорости при срыве пламени без ЭП.

Для спектрально-аналитической регистрации собственного излучения пламени на длинах волн возбужденных радикалов  $\text{CH}^*$  и  $\text{OH}^*$  применялись камера с усилителем изображения Imager Intense CCD (пространственное разрешение  $1376 \times 1040$  пиксел, частота кадров 10 Гц, экспозиция 0.5 мс) и соответствующие интерференционные фильтры. Под воздействием на пламя ЭП с изменяемой во времени конфигурацией возрастает локальная интенсивность излучения возбужденных радикалов  $\text{CH}^*$  и  $\text{OH}^*$ . При горении пропана распределение интенсивности излучения радикала  $\text{CH}^*$  пропорционально скорости тепловыделения [11], интеграл от которой дает изменение полноты сгорания по высоте факела. На рис. 5 области стабилизации пламени соответствует высота его подъема  $\approx 20$  мм. Наблюдается увеличение интенсивности излучения при включении ЭП, свидетельствующее об интенсификации горения в области стабилизации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении поведения диффузионного факела, помещенного между пластинами, на которые подавалось напряжение, установлено, что при различных расходах пропана область стабилизации (точки поджога) с ростом напряжения стремится в место с максимальной напряженностью ЭП. Увеличение частоты им-

пульсов ЭП ведет к стабилизации пламени в том же положении, что и при воздействии постоянного поля.

Применение электрического поля с изменяемой во времени конфигурацией позволяет стабилизировать поднятое диффузионное пламя в плоскости электродов в широком диапазоне скоростей истечения топлива выше значения скорости при срыве пламени без ЭП. При этом происходит интенсификация процесса горения в области стабилизации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. — М.: Энергия, 1976.
2. Степанов Е. М., Дьячков Б. Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. — М.: Металлургия, 1968. — С. 208–312.
3. Barmina I., Ciprijs A., Valdmans J., Valdmans R., Zake M. Electric field effect on biomass combustion characteristics // 14th Intern. Scient. Conf. «Engineering for Rural Development», 20–22.05.2015, Jelgava, Latvia. — P. 516–521.
4. Murphy D. C., Sanchez-Sanz M. S., Fernandez-Pello C. An experimental and numerical study of flames in narrow channels with electric fields // J. Phys.: Conf. Ser. 557. — 2014. — DOI 10.1088/1742-6596/557/1/012076.
5. Volkov E. N., Kornilov V. N., de Goey L. P. H. Experimental evaluation of DC electric field effect on the thermoacoustic behaviour of flat premixed flames // Proc. Combust. Inst. — 2013. — V. 34, iss. 1. — P. 955–962.
6. Третьяков П. К., Тупикин А. В., Ганеев О. В., Денисова Н. 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.
7. Dolmansley T. J. C., Wilson Ch. W., Stone D. A. Electrical modification of combustion and the affect of electrode geometry on the field produced // Model. Simul. Eng. — 2011. — V. 2011. — <http://dx.doi.org/10.1155/2011/676428>.
8. 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.
9. Тупикин А. В., Третьяков П. К., Денисова Н. В., Замашиков В. В., Козулин В. С. Диффузионный факел в электрическом поле с изменяемой пространственной конфигурацией // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 49–53.

- 
10. **Баев В. К., Ясаков В. А.** Исследование устойчивости диффузионного пламени // Изв. Сиб. отд-ния АН СССР. Сер. Техн. науки. — 1969. — № 3, вып. 1. — С. 38–42.
11. **Orain M., Hardalupas Y.** Effect of fuel type on equivalence ratio measurements using chemiluminescence in premixed flames // Compt. R. Méc. — 2010. — V. 338, N 5. — P. 241–254.

*Поступила в редакцию 18/II 2016 г.,  
в окончательном варианте — 22/IX 2016 г.*

---