

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 OH^* и 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 H_3O^+ , 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 смещения 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-

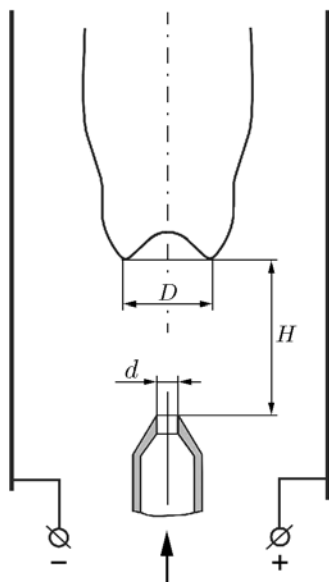


Рис. 1. Схема эксперимента с импульсно-периодическим ЭП

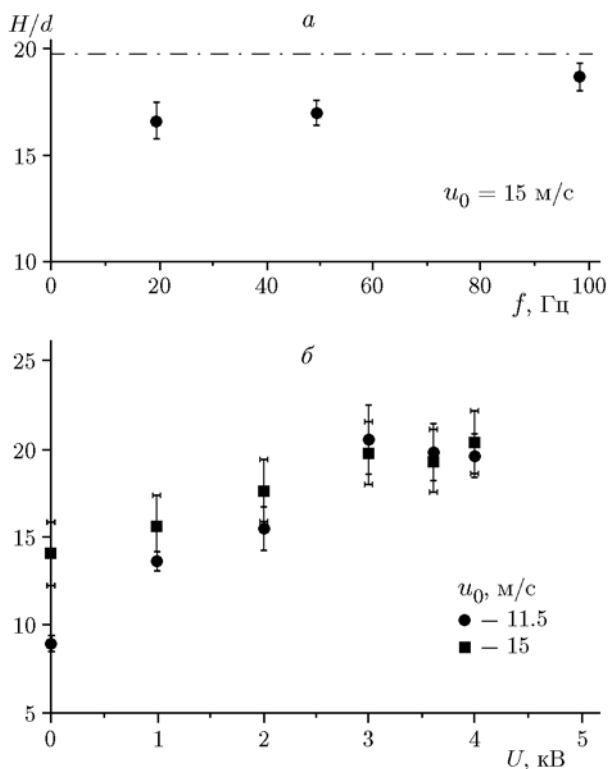


Рис. 2. Безразмерная высота подъема факела: а — в зависимости от частоты импульсов ($U = 3.8$ кВ), б — в зависимости от напряжения

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-

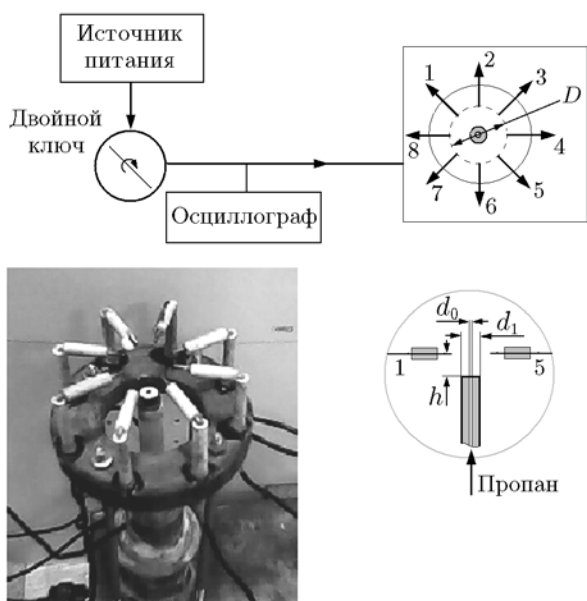


Рис. 3. Схема эксперимента со стабилизацией ЭП с изменяемой во времени конфигурацией силовых линий

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 ± 0.6 до 29.4 ± 0.6 м/с для пропана и от 14.2 ± 0.6 до 27.1 ± 0.6 м/с для метана.

Регистрация формы пламени велась камерой High Speed Star 3 (LaVision) с разрешением 1024×1024 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: $H/d = f(\rho_T/\rho_{ок}, No)$, где ρ_T — плотность топлива, $\rho_{ок}$ — плотность окислителя, No — критерий гомохронности (отношение характерных времен горения $\tau_{гор}$ и течения

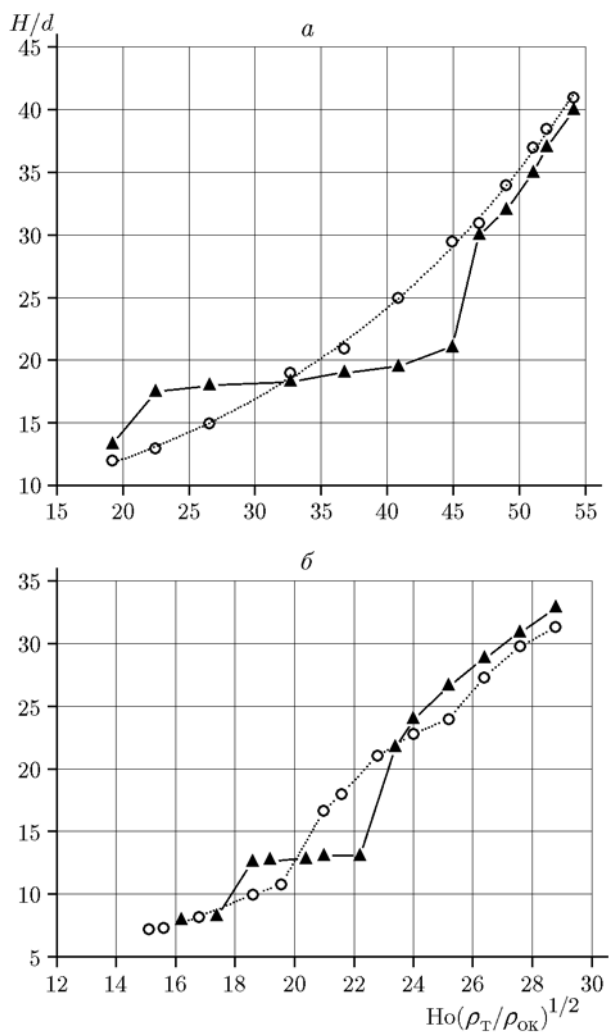


Рис. 4. Зависимость безразмерной высоты подъема факела пропана (а) и метана (б) от критерия гомохронности и отношения плотностей топлива и окислителя:

▲ — с воздействием ЭП, ○ — без воздействия ЭП

$\tau_{теч}$, $No = \tau_{гор}/\tau_{теч} = u_0\tau_{гор}/d$) [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 ($H/d \approx const$) на графиках рис. 4, соответствующих условиям с воздействием ЭП на горение. Кро-

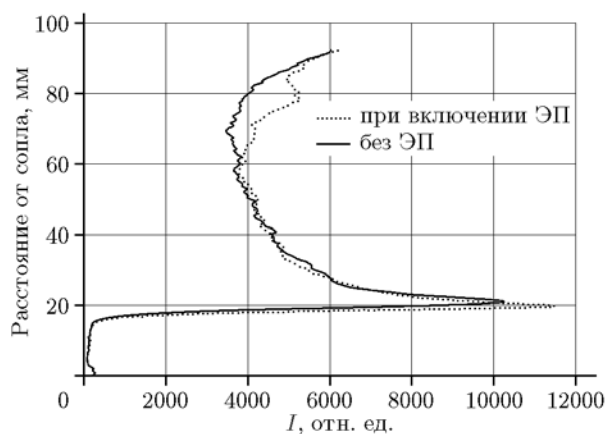


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения радикала CH^* по высоте пламени пропана (скорость истечения пропана 18 м/с)

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 CH^* и OH^* применялись камера с усилителем изображения Imager Intense CCD (пространственное разрешение 1376×1040 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 CH^* и OH^* . При горении пропана распределение интенсивности излучения радикала 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 ≈ 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 Goeij 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.*
