

О. В. Ганеев¹, В. Н. Зудов¹, П. К. Третьяков¹, А. В. Тупикин^{1,2}

¹ Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: tupikin@itam.nsc.ru

ДИФФУЗИОННОЕ ПЛАМЯ ПРОПАНА В СЛАБОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ *

В настоящее время во многих технологических устройствах производится сжигание топлива в диффузионном режиме горения. Одной из проблем остается стабилизация пламени при повышенном расходе воздуха. Воздействие электрических полей является эффективным средством управления пламенем, так как в зоне реакции присутствует ионизованная среда. Наложение поля на горение может в значительной степени улучшить условия стабилизации. В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния слабого электрического поля на диффузионное горение пропана, в том числе при наличии спутного потока воздуха. Рассмотрено влияние поля на интегральные характеристики пламени: высоту подъема, условия и режимы стабилизации.

Ключевые слова: диффузионное горение, воздействие электрического поля, высота подъема факела, условия стабилизации.

Введение

В последние годы все более актуальным становится совершенствование технологий, позволяющих улучшить процессы сжигания топлива. Это связано с возросшими экологическими требованиями к уровню содержания вредных веществ в продуктах сгорания. Одним из направлений в поиске решений стало применение внешних источников энергии для уменьшения барьера протекания химических реакций (снижение периода индукции и времени химической реакции) или изменения гидродинамической структуры течения. В качестве источника энергии предлагаются лазерное излучение, СВЧ и электрические разряды различных типов [1–5]. Также рассматриваются возможности применения слабых электрических полей, с напряженностями,

не достаточными для пробоя среды. Влияние электрического поля на процессы стабилизации представлено в [6]. В расчетно-теоретической части работы в кинетической схеме были учтены реакции хемоионизации, а в качестве ведущего механизма выбрано гидродинамическое воздействие «ионного ветра» на стабилизацию диффузионного факела. При определенном напряжении получены режимы с колебаниями пламени при включении поля. Причины, по которым это происходит, в работе не объяснены. Особый интерес представляют процессы, связанные с нестационарными явлениями. В [7] показано существование режимов, в которых влияние частоты и напряженности переменного электрического поля носит нелинейный характер. Авторы затрудняются назвать причины, хотя считают основным механизмом воздействие поля на гидродинамиче-

* Работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований СО РАН (проект III.19.5.4., регистрационный номер 01201057896) и при финансовой поддержке Программой фундаментальных исследований «Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления» РАН № 1 (проект 1.2).

ские процессы при горении. Остается открытым вопрос о влиянии на скорость протекания химических реакций. Отсутствуют публикации, в которых были бы рассмотрены критерии обобщения интегральных характеристик при воздействии электрических полей. Для переноса результатов, полученных в лабораторных условиях, на технологические устройства необходимо определить влияние геометрических размеров.

В работе приведены результаты изучения влияния слабого электрического поля на диффузионное пламя пропана. Рассмотрены случаи истечения пропана в затопленное пространство и в спутный поток воздуха при воздействии постоянным и импульсно-периодическим электрическим полем. В рамках отдельной серии опытов, при изменении диаметра струи пропана, выполнено обобщение данных. Результаты могут быть использованы при создании физической модели воздействия внешнего электрического поля на физико-химические и гидродинамические процессы при сжигании углеводородных топлив, а также для улучшения эффективности работы горелочных устройств.

Экспериментальная установка

На рис. 1 представлена схема горелочного устройства. Спутный поток воздуха формируется в профилированном сопле 1 (диаметр 20 мм), на входе которого расположены выравнивающие сетки. Применение профиля Витошинского дает равномерное распределение скорости на срезе сопла. Сменное сопло 2 для подачи пропана имело выходной диаметр 2, 2,5, 3 и 3,5 мм. Положительным электродом было медное кольцо 3 с внутренним диаметром 20 мм, расположенное на высоте 30 мм, другим электродом – горелочное устройство. Измерение расхода газов производилось регуляторами расхода «Bronkhorst ElFlow» (с точностью не хуже 1%). В опытах скорость истечения пропана достигала 25 м/с ($Re \approx 18\,000$), спутного потока – до 3 м/с (до $Re_{воз} \approx 1\,500$).

Регистрация формы пламени проводилась с применением спектрозональной съемки на длине волны излучения радикала CH , обеспечиваемой интерференционным фильтром. Для этого была задействована Imager in-

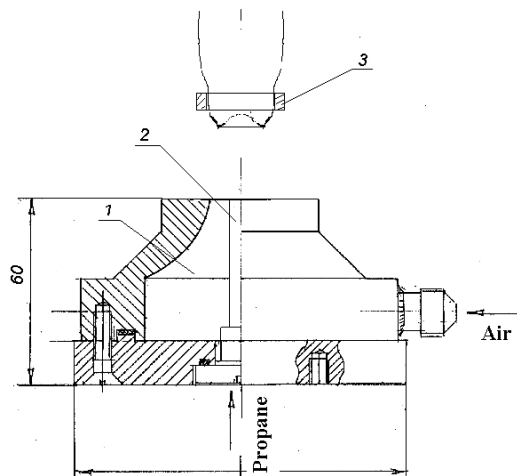


Рис. 1. Схема горелки: 1 – форкамера и сопло спутной подачи воздуха; 2 – сменное топливное сопло; 3 – кольцевой электрод

tense CCD камера с динамическим диапазоном 12 бит, пространственным разрешением $1\,376 \times 1\,040$ пиксел, частотой кадров 10 Гц, с PC PCI граббером, минимальной экспозицией 1 мкс (входящая в диагностический комплекс «Flame Master»). При определении высоты подъема факела выполнялось осреднение данных 15–20 кадров.

Результаты

Основным объектом для изучения было поднятое диффузионное пламя пропана, на которое производилось воздействие электрическим полем аксиальной симметрии. На рис. 2. представлена конфигурация электрического поля при отсутствии пламени (линии напряженности). Для расчета использовалось уравнение Пуассона, при решении которого был применен метод расщепления. Характеристикой процесса стабилизации горения выбрана высота подъема факела (H). Рис. 3 показывает зависимость этого параметра, отнесенного к диаметру сопла подачи пропана (H/d), от скорости истечения в затопленное пространство. Вид зависимости близок к линейному. С ростом напряжения улучшаются условия стабилизации, о чем свидетельствует смещение графиков в область более высоких скоростей. Пересечения с осью абсцисс нет, смена режима стабилизации от поднятого пламени к стабилизации на кромке происходит скачком.

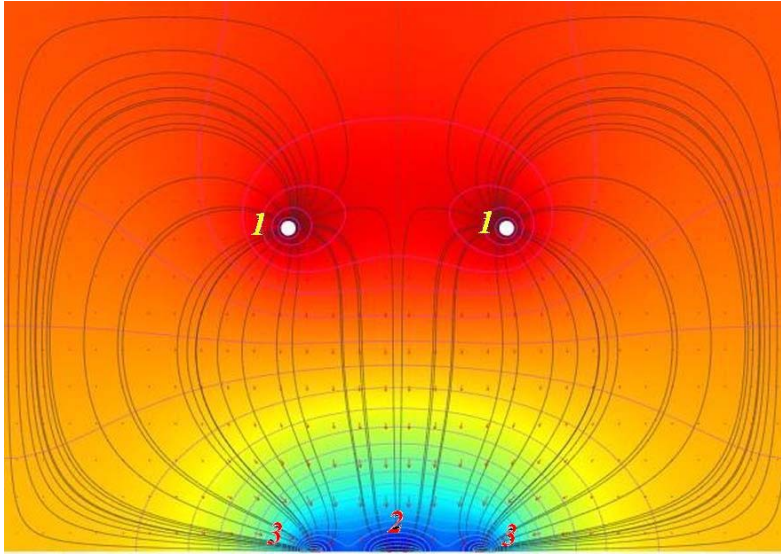


Рис. 2. Конфигурация электрического поля: 1 – кольцо; 2 – сопло подачи пропана; 3 – кромка сопла спутного потока

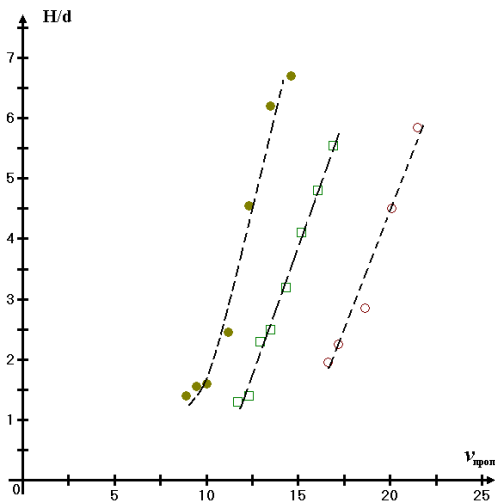


Рис. 3. Зависимость высоты подъема факела от скорости истечения пропана: ● – без электрического поля; ○ – напряжение 500 В и □ – напряжение 1 000 В

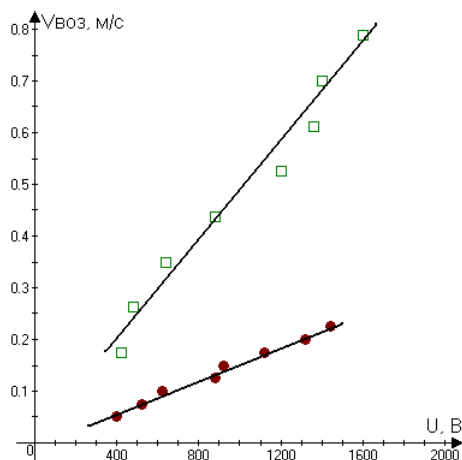


Рис. 4. Скорость спутного потока и приложенного напряжения в момент присоединения к кромке: □ – $v_{\text{проп}} = 10$ м/с ($Re_j \approx 5000$); ● – $v_{\text{проп}} = 15$ м/с ($Re_j \approx 7500$)

В отдельной серии опытов было рассмотрено изменение режима стабилизации в зависимости от напряжения, подаваемого на кольцо, и скорости спутного потока воздуха. Поднятое пламя в спутном потоке стабилизировалось между электродами при заданном напряжении. При уменьшении скорости спутного потока фиксировался момент смены режима стабилизации, присоединение пламени на кромку сопла. Эксперименты проводились для двух значений скорости истечения пропана (10 и 15 м/с). Результаты представлены на рис. 4. Наблюдается линейная связь между подводимым на схему напряжением и скоростью спутного потока, при которой происходит присоединение пламени к кромке горелки. Увеличение скорости спутного потока приводит к изменению положения области стабилизации – она перемещается вверх. Действие электрических сил на пламя пропорционально напряженности поля и направлено в противоположную сторону. Видно, что устанавливается линейная зависимость между напряжением и скоростью спутного потока. Возможно, такое поведение пламени связано с воздействием ионного ветра [8].

В ходе экспериментов было изучено влияние импульсно-периодического электрического поля на высоту подъема факела. Установлено, что с ростом скорости спутного потока высота подъема факела для различных частот при сохранении скважности электрических импульсов $n = 1$ стремится к значению без воздействия поля. Пример зависимости высоты подъема факела от ско-

рости спутного потока представлен на рис. 5. Напряжение – 1 кВ, диаметр сопла подачи пропана – $d = 3$ мм, скорость пропана – 16,5 м/с ($Re \approx 13\,000$). При стабилизации над кольцевым электродом влияние электрического поля незначительное. Очевидно, это связано с конфигурацией электрического поля. Выше кольцевого электрода напряженность поля быстро падает с удалением вверх от кольца. На малых частотах при фиксированной длительности электрических импульсов ($\tau_n = 2$ мс) между последовательными импульсами восстанавливается невозмущенная картина стабилизации. Диапазон скоростей истечения пропана был ограничен, с одной стороны, необходимостью стабилизации горения на высоте меньшей, чем расстояние от кольцевого электрода до сопла, с другой – реализацией устойчивого режима поднятого пламени.

В работе [9] для описания диффузионных пламен использовались предположения:

1) топливо-воздушная смесь гомогенна перед фронтом пламени;

2) распределение концентрации в мертвой зоне соответствует распределению при смешении без горения;

3) в точках поджога выполняется условие стабилизации $[(\text{grad } u) \cdot \tau_{\Gamma}]_{\min} = \text{const}$.

Считая, что в пограничном слое струи градиент продольной скорости существенно больше градиента поперечной скорости, условие (3) может быть записано следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \cdot \tau_{\Gamma \min} = \text{const}.$$

Отсюда, основываясь на экспериментальных данных, авторы получили, что для безразмерной высоты подъема факела

$$\frac{H}{d} \approx \frac{u \cdot \tau_{\Gamma \min}}{d} \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_e}},$$

где ρ_j – плотность горючего газа; ρ_e – плотность среды, в которую истекает струя; $\tau_{\Gamma \min}$ – минимальное характерное время горения (время пребывания в ламинарном фронте пламени). Этот подход может быть использован для описания воздействия электрического поля на диффузионное горение в спутном потоке воздуха. Считая предположения о стабилизации диффузионного пламени действительными для условий со спутным потоком воздуха, можно предположить, что изменение в градиенте скоро-

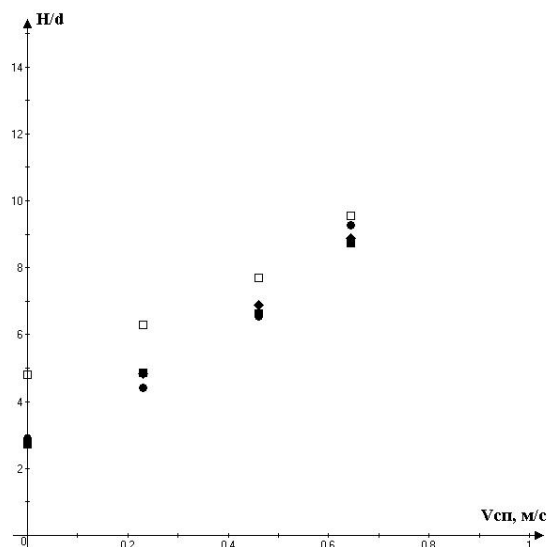


Рис. 5. Зависимость высоты подъема факела от скорости спутного потока воздуха: □ без поля, ● $f = 50$ Гц, ■ $f = 125$ Гц, ◆ $f = 250$ Гц

сти (условие 3) зависит от величины скорости спутного потока и числа Рейнольдса топливной струи. Учитывая, что зависимость высоты подъема факела от скорости спутного потока – практически линейная функция, в качестве безразмерного критерия можно взять

$$K = \frac{V_{\text{сп}} \cdot d}{\Delta H \cdot u_n}$$

отношение скорости спутного потока к изменению относительной высоты подъема факела ($\Delta H/d = H/d - H_0/d$, H_0 – высота подъема факела без спутного потока) и максимальному значению нормальной скорости горения (скорости распространения ламинарного пламени, для пропана $u_n \approx 0,4$ м/с).

На рис. 6. приведено обобщение полученных данных. По оси ординат отложен безразмерный критерий, характеризующий влияние скорости спутного потока и диаметра сопла на высоту подъема факела. Точки с воздействием электрического поля лежат выше, что свидетельствует об улучшении условий горения. Для бедных смесей пропана ($\alpha = 1,3$) в ламинарном режиме горения было зарегистрировано изменение скорости распространения пламени на 30 % [10].

В заключение следует отметить, что электрическое поле аксиальной симметрии улучшает условия горения и стабилизации

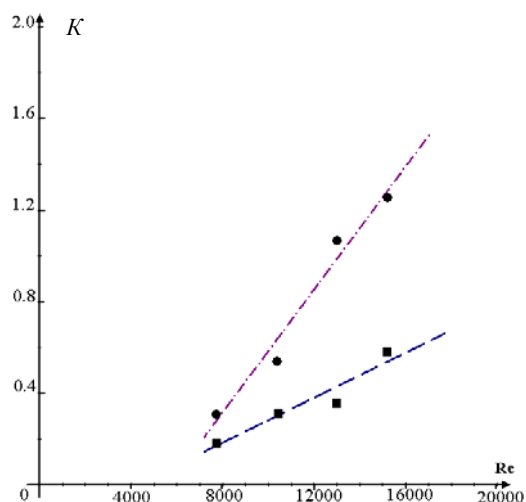


Рис. 6. Зависимость критерия K от числа Рейнольдса для струи пропана: штриховая линия – без ЭП, штрихпунктирная – с ЭП ($f = 250$ Гц, $U = 1$ кВ)

диффузионного пламени, для режимов с истечением в затопленное пространство и спутный поток воздуха. Эффект воздействия импульсно-периодического поля на пламя зависит от частоты и длительности электрических импульсов. Показано, что для условий экспериментов возможно определенное обобщение экспериментальных данных. В качестве критерия предложено отношение скорости спутного потока к изменению относительной высоты подъема факела и максимальному значению нормальной скорости горения (в соответствии с условием стабилизации поднятого пламени). Результаты могут быть использованы при создании физической модели воздействия внешнего электрического поля на физико-химические и гидродинамические процессы при сжигании углеводородных топлив, и для улучшения эффективности работы горелочных устройств.

Список литературы

1. Tanoff M. A., Smooke M. D., Teets R. E., Sell J. A. Computational and Experimental Stu-

dies of Laser-Induced Thermal Ignition in Premixed Ethylene-Oxidizer Mixtures // Combustion and Flame. 1995. Vol. 103. No. 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 Eximer-Laser Photolysis of NH_3 // Combustion and Flame. 1991. Vol. 87. No. 2. P. 191–202.

3. Старик А. М., Тутова Н. С. О возможности интенсификации цепных реакций в горючих смесях при возбуждении электронных состояний молекул O_2 лазерным излучением // Докл. Академии наук. 2003. Т. 391, № 4. С. 471–477.

4. Воронцов С. С., Третьяков П. К., Тупикин А. В. Воздействие на ламинарное пламя пропано-воздушной смеси импульсно-периодического излучения CO_2 -лазера // Химическая физика. 2010. № 1. С. 53–57.

5. Aleksandrov N. L., Kindysheva S. V., Kirpichnikov A. A., Kosarev I. N., Starikovskaia 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. Vol. 40. P. 4493–4502.

6. Belhi M., Domingo P., Vervisch P. Effect of Electric Field on Flame Stability // Proc. of the European Combustion Meeting. Vienna, 2009. P. 1–6.

7. Kim M. K., Kim H. H., Chung S. H. Effect of AC Electric Fields on the Stabilization of Premixed Bunsen Flames // 33rd Intern. Symposium on Combustion. Beijing, China, 2010.

8. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. М.: Энергия, 1976. 293 с.

9. Баев В. К., Ясаков В. А. Исследование устойчивости диффузионного пламени // Изв. СО АН СССР. 1969. № 3, вып. 1.

10. Третьяков П. К., Тупикин А. В., Зудов В. Н. Воздействие лазерного излучения и электрического поля на горение углеводородовоздушных смесей // ФГВ. 2009. Т. 45, № 4. С. 77–85.

Материал поступил в редколлегию 09.02.2012

O. V. Ganeev, V. N. Zudov, P. K. Tretyakov, A. V. Tupikin

DIFFUSION FLAME OF PROPANE IN A WEAK ELECTRIC FIELD

Now burning fuel in technological devices is made in a diffusion condition. To one of problems remains to stabilization of a flame at large flow rate of air. The affecting of electrical fields is an effective remedy of control of a flame since at a band of a response there is an ionised medium. Field imposing on combustion can improve conditions of a regulation substantially. In a job results of an experimental research of influence of a weak electrical field on diffusion combustion of the propane, including in the presence of coflow are presented. Influence of a field on integrated performances of a flame is viewed: altitude of a lifting, a condition and stabilization modes.

Keywords: diffusion flame, affecting of electrical fields, altitude of a lifting, stabilization modes.