

## ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО И ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГОРЕНИЕ ПРОПАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

А. Ф. Гаранин, П. К. Третьяков, А. В. Тупикин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск  
lab2@itam.nsc.ru

Проведено экспериментальное исследование воздействия постоянного и импульсно-периодического электрического поля на горение пропановоздушной смеси. Опыты проводились для ламинарного и турбулентного режимов горения при стабилизации пламени отрывной зоной за центральным телом. Обнаружено различие между воздействием на скорость горения постоянного электрического поля и импульсно-периодического.

Ключевые слова: скорость распространения пламени, ламинарный и турбулентный режимы горения, импульсно-периодическое электрическое поле, устойчивость.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности сжигания топлива в различных технологических установках и уменьшение содержания вредных выбросов — одна из актуальных научно-технических задач настоящего времени. Ведется поиск ее решения с применением различных способов воздействия на горение, приводящих к уменьшению барьера протекания химической реакции и тем самым к увеличению скорости горения и расширению концентрационных пределов стабилизации пламени в область бедных смесей. К настоящему времени сформировался ряд направлений фундаментального характера по исследованию внешнего энергетического воздействия на реагирующие течения, одним из которых является изучение воздействия электрических полей (ЭП) на горение газов [1]. В работах [1–3] рассматривались различные возможные механизмы процесса взаимодействия: омический нагрев смеси, возникновение «ионного ветра», изменение кинетики реакций. Эксперименты [4, 5] показали, что при истечении в атмосферу пропановоздушных смесей пламя можно рассматривать как низкотемпературную плазменную среду со следующими свойствами: квазинейтральностью, амбиполярной диффузией и экранировкой от внешних электрических полей. В этом случае «ионный

ветер» вносит основной вклад в воздействие ЭП на процесс горения. Также было установлено, что ЭП, направленное поперек потока, может турбулизовать пламя, изменяя условия диффузии и теплообмена.

В настоящей работе рассматривается воздействие постоянного и импульсно-периоди-

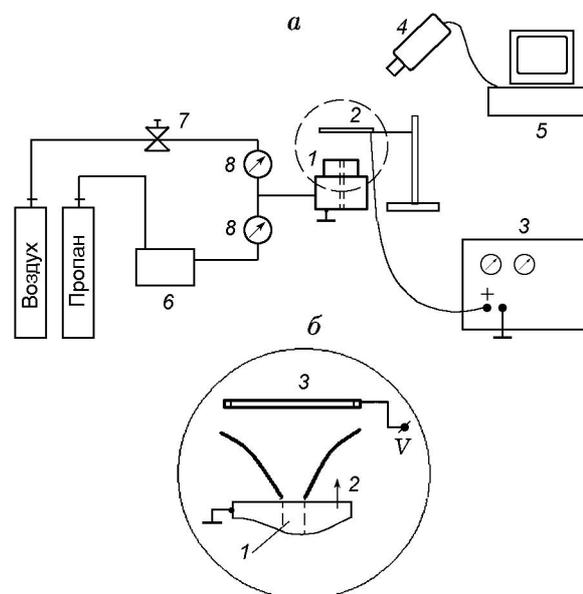


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

*а* — общий вид: 1 — горелочное устройство (сопло), 2 — электрод, 3 — электрическая схема, 4 — камера, 5 — компьютер, 6 — блок дозирования газов, 7 — воздушный редуктор, 8 — расходомеры; *б* — схема стабилизации: 1 — стабилизатор (центральное тело), 2 — поток смеси, 3 — кольцо (положительный электрод)

Работа выполнена при финансовой поддержке научной программы Президиума РАН (П-9.2) «Фундаментальные проблемы магнитоплазменной аэродинамики», Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-01-00560) и фонда Президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-8597.2006.1).

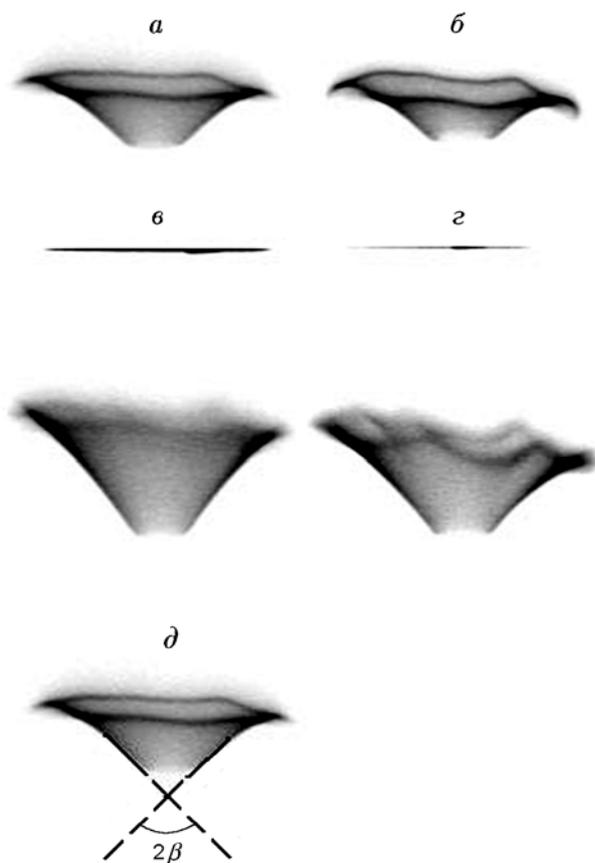


Рис. 2. Воздействие постоянного ЭП на форму ламинарного (*a, б*) и турбулентного (*в, г*) пламени:

*a, в* — без ЭП, *б, г* —  $V = 2$  кВ; *д* — способ определения угла фронта пламени в ядре струи

ческого ЭП на скорость горения ламинарных и турбулентных пламен однородных пропановоздушных смесей. Отличием от известных литературных данных является возможность управления длительностью импульса и частотой.

### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Подготовленная смесь истекала из сопла (рис. 1,*а*) с внутренним диаметром 20 мм со средней скоростью  $u_0 \approx 0.5 \div 2$  м/с (число Рейнольдса  $Re \approx 650 \div 2500$ ) и стабилизировалась отрывной зоной за центральным цилиндрическим телом диаметром 6 мм (см. рис. 1,*б*). На высоте  $h = 40$  мм располагался электрод — кольцо диаметром 28 мм. Сопло было заземлено. На электрод от электрической

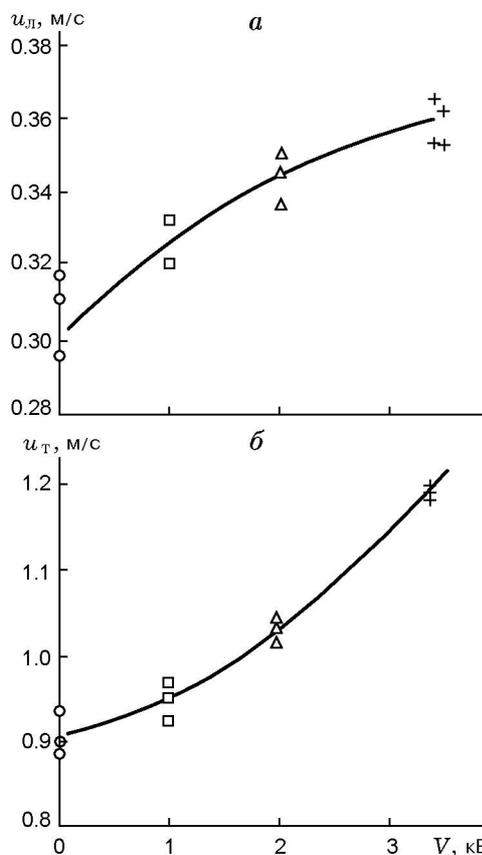


Рис. 3. Влияние ЭП на ламинарное и турбулентное горение пропана:

*a* — ламинарное,  $u_0 = 0.5$  м/с,  $\alpha = 1.3$ , *б* — турбулентное,  $u_0 = 2$  м/с,  $\alpha = 1.3$

схемы, включающей источник питания и силовой ключ, подавалось постоянное и импульсно-периодическое напряжение ( $V = 0 \div 4$  кВ). Применение высоковольтного силового ключа позволяло создавать импульсно-периодическое ЭП с регулируемой длительностью импульса и скважностью. Постоянный в течение опыта расход пропана поддерживался блоком дозировки газов, расход воздуха задавался редуктором. Во всех режимах, исключая те, в которых происходил пробой среды, ток в цепи составлял  $I = 10 \div 150$  мкА. Геометрическая форма пламени фиксировалась камерой технического зрения по излучению пламени на длине волны радикала  $C_2$ . Такая схема регистрации позволяет получить четкую границу фронта горения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

При подаче напряжения происходило изме-

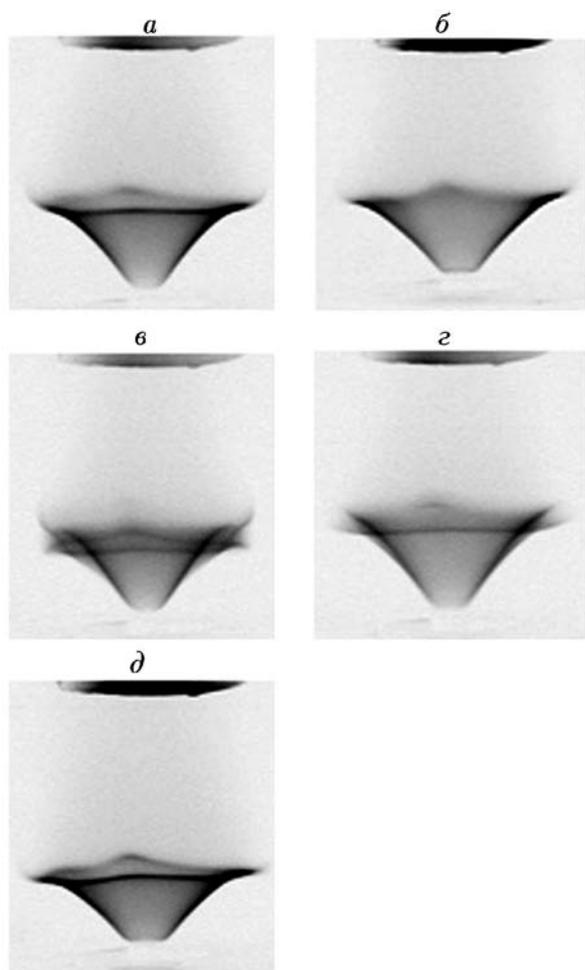


Рис. 4. Влияние частоты на форму ламинарного пламени:

*a* — без ЭП, *б* — постоянное ЭП,  $V = 2$  кВ; *в-д* — импульсно-периодическое ЭП,  $V = 2$  кВ,  $f = 20$  (*в*), 50 (*г*) и 150 Гц (*д*)

нение формы пламени. Одной из причин такого изменения может быть электродинамическое воздействие вследствие возникновения ионного ветра [1]. При таком механизме в зависимости от геометрии ЭП, его напряженности и частоты возможно изменение площади поверхности горения с сохранением нормальной скорости пламени. В [6] экспериментально показано увеличение скорости распространения пламени в неподвижной среде в трубе при наложении постоянного ЭП. Как следует из приведенных на рис. 2 примеров изменения геометрии пламени в ламинарном и турбулентном режимах горения, основное влияние ЭП сводится к увеличению угла фронта пламени в ядре топливо-

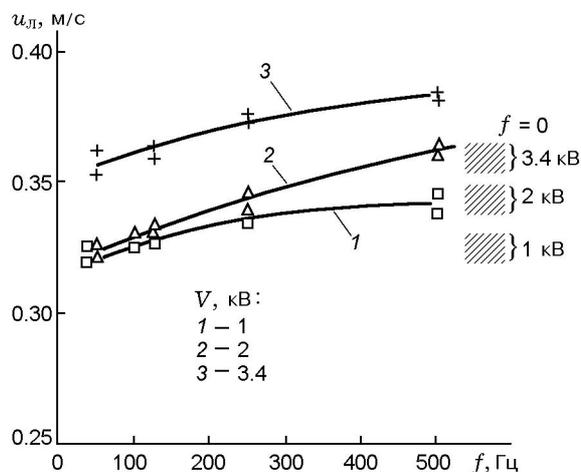


Рис. 5. Зависимость скорости распространения пламени от частоты

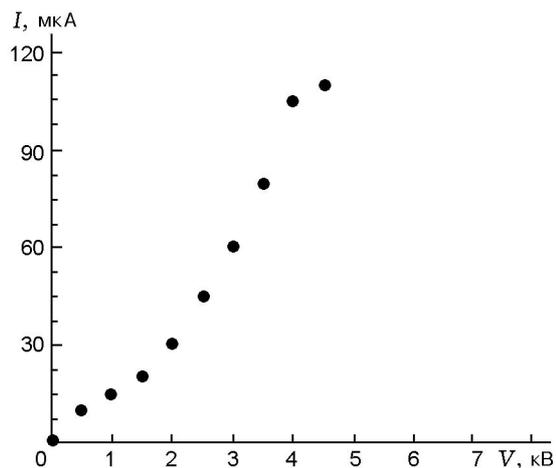


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика пламени ( $u_0 = 1.15$  м/с,  $\alpha = 1.35$ ;  $Re = 1500$ )

воздушной струи. Принимая за скорость распространения пламени нормальную составляющую средней скорости истечения к поверхности фронта горения в ядре струи (см. рис. 2), можно определить влияние ЭП. Эти данные для постоянного ЭП приведены на рис. 3. В ламинарном режиме ( $u_0 = 0.5$  м/с, коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1.3$ ) скорость распространения пламени увеличивается приблизительно на 20 % при изменении напряжения до 3.4 кВ. Для турбулентного режима горения ( $u_0 = 2.0$  м/с,  $\alpha = 1.3$ ) вид зависимости скорости распространения пламени от напряжения меняется. Влияние напряжения растет, и скорость пламени в этом же диапазоне  $V = 1 \div 3.4$  кВ увеличивается приблизительно

но на 30 %. Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными другими исследователями [7, 8].

Влияние частоты импульсов ЭП ( $f$ ) на форму и скорость пламени для ламинарного режима горения иллюстрируют рис. 4, 5. Начиная с некоторого значения  $f$  ( $f \approx 150$  Гц при  $V = 1$  кВ) увеличение частоты при сохранении постоянной длительности импульса (4 мс) приводит к заметному увеличению скорости пламени по сравнению с постоянным ЭП (до 10 %).

В экспериментах обнаружено влияние постоянного ЭП на устойчивость пламени при переходе от ламинарного течения к турбулентному ( $u_0 = 1.15$  м/с,  $\alpha = 1.35$ ;  $Re = 1500$ ). Так, при подаче напряжения  $V = 0.5$  кВ амплитуда колебаний фронта пламени заметно уменьшалась, дальнейшее повышение вызывало рост скорости распространения пламени без потери устойчивости. При  $V \approx 2$  кВ происходила смена режима, возникал «шум» и появлялись пульсации фронта, которые возрастали с дальнейшим увеличением  $V$ . Смена режима горения отражается на вольт-амперной характеристике пламени (рис. 6). Этому переходу соответствует точка перегиба на кривой ( $V \approx 2$  кВ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование влияния постоянного и импульсно-периодического ЭП на горение пропановоздушной смеси. Показано, что для ламинарного режима скорость горения при воздействии импульсно-периодического ЭП может быть выше, чем при постоянном ЭП. Обнаружено влияние постоянного ЭП на устойчивость горения при ламинарно-турбулентном переходе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Лаутон Дж., Вайнберг Ф.** Электрические аспекты горения. М.: Энергия, 1976.
2. **Zake M., Turlajs D., Purmals M.** Electric field control of  $\text{NO}_x$  formation in the flame channel flows // Global Nest: the Intern. J. 2000. V. 2, N 1. P. 99–108.
3. **Ватажин А. Б., Лихтер В. А., Сепп В. А., Шульгин В. И.** Влияние электрического поля на эмиссию окислов азота и структуру диффузионного пламени // Газовая динамика (избранное). М.: Физматлит, 2001. Т. 2. С. 701–713.
4. **Исаев Н. А.** Механизм влияния сильных постоянных электрических полей на пламя // Физика вибрационного горения и методы ее исследования. Чебоксары: Чувашский гос. ун-т, 1971. Вып. 1. С. 58–73.
5. **Медведев Н. А., Максимов Н. Н., Абруков С. А., Новиков В. Е.** Экспериментальное исследование воздействия продольного электрического поля на распространение пламени в вертикальном полуоткрытом канале // Физика горения и методы ее исследования. Чебоксары: Чувашский гос. ун-т, 1975. Вып. 4. С. 91–102.
6. **Noorani R. I., Holmest R. E.** Effects of electric fields on the flame propagation velocity of methane-air flame // AIAA Journal. 1986. V. 24, N 1. P. 190–192.
7. **Медведев Н. А., Михеев М. П.** О влиянии электрического поля на распространение пламени в трубке // Физика вибрационного горения и методы ее исследования. Чебоксары: Чувашский гос. ун-т, 1971. Вып. 1. С. 79–86.
8. **Попов А. В., Шеклейн А. В.** Спектроскопическое исследование плоского метановоздушного пламени в электрическом поле // Науч.-техн. проблемы горения и взрыва. 1965. № 1. С. 76–79.

*Поступила в редакцию 1/VI 2007 г.,  
в окончательном варианте — 7/VIII 2007 г.*