

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СТАБИЛИЗАЦИЮ ТУРБУЛЕНТНОГО ПРОПАНОВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ

Д. А. Ягодников

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 107005 Москва

Рассмотрено воздействие внешнего электрического поля на горение предварительно перемешанной пропановоздушной смеси в турбулентном потоке. Исследовано влияние геометрических параметров турбулизирующих пластин, полярности прикладываемого напряжения и диаметра цилиндрического сетчатого электрода на величину скорости срыва пламени. Показано, что наибольшее значение скорости срыва реализуется при использовании электрода меньшего диаметра и пластин, генерирующих крупномасштабную турбулентность. Дано сравнение интенсивности воздействия электрического поля на ламинарное и турбулентное пламена.

В многочисленных экспериментальных работах, связанных с изучением воздействия внешнего электрического поля (ВЭП) на характеристики воспламенения и горения различных топлив, в большинстве случаев объектом исследования были ламинарные пламена, стабилизируемые на срезе сопла горелки [1, 2] или распространяющиеся в трубах [3, 4]. Вполне очевидно, что процессы сжигания топлива в энергетических устройствах протекают в турбулентном режиме. Тем не менее число публикаций, где приводятся данные по влиянию ВЭП на турбулентное пламя, невелико [5–7]. Причем в [5] указывается, что в случае распространения пламени в трубе (от закрытого конца к открытому) наложение как постоянного, так и переменного напряжения $U = 0 \div 47$ кВ не приводит к изменению концентрационных пределов распространения. Однако при исследовании горения двухфазной топливной смеси за плохообтекаемым телом (конусом) [6] и в процессе огневых испытаний модельной двигательной установки [7] зарегистрировано интенсифицирующее влияние ВЭП, заключающееся в изменении температуры и длины факела продуктов сгорания. Противоречивость этих результатов, а также необходимость иметь для практических нужд информацию, полученную в условиях, максимально приближенных к реальным, обусловили задачу этой работы — определение влияния ВЭП на особенности процессов воспламенения и горения в турбулентном потоке.

Исследования проводили на горелке, выполненной в виде металлической трубы длиной 265 мм с внутренним диаметром $D = 28$ мм. В качестве топлива использовали предварительно перемешанную пропановоздушную смесь.

Для стабилизации пламени и турбулизации потока на срезе трубы устанавливали перфорированную пластину диаметром 30 и толщиной 3 мм с шахматным расположением отверстий. В экспериментах регистрировались скорость потока в трубе, при которой происходит срыв пламени — скорость срыва $u_{ср}$; варьируемые параметры — диаметр отверстий $d_{от}$, расстояние между их центрами l , коэффициент живого сечения f и плотность расположения отверстий n (см. таблицу). В соответствии с [8] для турбулентного потока в следе за перфорированной пластиной лагранжев линейный масштаб имеет величину порядка диаметра отверстий, а среднее значение интенсивности турбулентности больше у пластины с меньшими значениями f (большее загромождение канала) при прочих равных условиях.

В работе реализована схема наложения поперечного электрического поля с использованием цилиндрического сетчатого электрода, выполненного из нержавеющей проволоки диаметром 0,5 мм с размером ячейки 1×1 мм. Диаметр и высота цилиндра составляют 75 и 200 мм соответственно. Методика проведения эксперимента изложена в [2]. Отметим только, что срыв пламени осуществлялся за счет по-

Номер пластины	n , см ⁻²	f	$d_{от}$, мм	l , мм	$d_{э.п.}$, мм
3	0,5	0,34	9,4	14	6,9
5	1	0,66	9,4	11	3,6
6	1	0,47	8	11	5,1
7	1	0,34	6,8	11	5,9
10	2	0,34	5,2	8	4,1

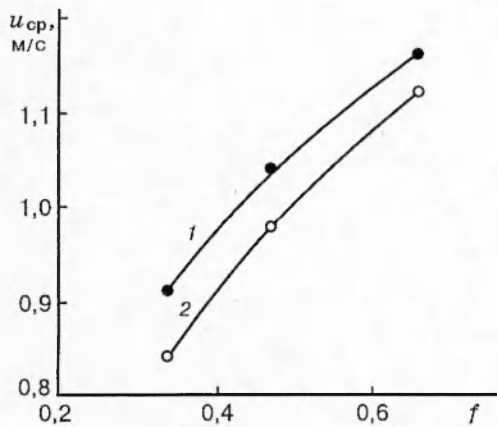


Рис. 1. Зависимость скорости срыва от коэффициента живого сечения пластины:
 $n = 1 \text{ см}^{-2}$; $m_{\text{п}} = 0,1 \text{ г/с}$; $U = 0,9 \text{ кВ}$ (1) и 0 (2)

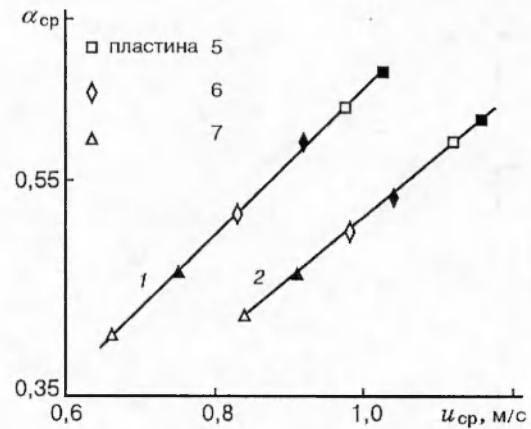


Рис. 2. Срывные характеристики пламени:
 $m_{\text{п}} = 0,08$ (1) и $0,1 \text{ г/с}$ (2); темные точки — $U = 0,9 \text{ кВ}$, светлые — $U = 0$

степенного увеличения массового расхода воздуха $m_{\text{в}}$ при фиксированном расходе пропана $m_{\text{п}}$. Интенсифицирующее воздействие ВЭП или отсутствие такового проверялось следующим образом. Если при наложении поля пламя стабилизировалось, то в момент размыкания цепи сразу происходил его срыв.

Установлено, что в случае приложения к горелке постоянного отрицательного потенциала $0,9 \text{ кВ}$ скорость срыва увеличивается (рис. 1). Причем с увеличением коэффициента живого сечения ($n = \text{const}$) и, следовательно, диаметра отверстий значение $u_{\text{ср}}$ возрастает как при воздействии ВЭП, так и без него, поскольку за перфорированной пластиной образуются более крупные вихри, приводящие к интенсификации процессов тепло- и массообмена между свежей топливной смесью и продуктами сгорания. Очевидно, что с ростом расхода воздуха изменяется соотношение компонентов на пределе стабилизации пламени и его срыв реализуется при конкретном сочетании значений скорости $u_{\text{ср}}$ и коэффициента избытка окислителя $\alpha_{\text{ср}}$ (рис. 2). Вид функций $\alpha_{\text{ср}}(u_{\text{ср}})$ следует из уравнений неразрывности и определения $\alpha_{\text{ср}}$:

$$u_{\text{ср}} = \frac{4(m_{\text{в}} + m_{\text{п}})}{\rho \pi D^2}, \quad \alpha_{\text{ср}} = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{п}} K_{m,0}}. \quad (1)$$

Поскольку плотность смеси ρ слабо зависит от соотношения компонентов (массовый стехиометрический коэффициент $K_{m,0} = 15,7$), из (1), исключая $m_{\text{в}}$, можно получить линейную зависимость $\alpha_{\text{ср}} = u_{\text{ср}} \rho \pi D^2 / 4 m_{\text{п}} - 1 / K_{m,0}$ при фиксированном $m_{\text{п}}$.

Интенсифицирующее воздействие ВЭП, по нашему мнению, объясняется влиянием ионного ветра [2], совпадающего с направлением движения положительных ионов (к горелке) и перемещающих с собой микрообъемы горячих газов. Это подтверждают фотографии пламени (рис. 3), из которых следует, что наложение ВЭП на уже начавшее отрываться пламя (см. рис. 3, а) вызывает его перемещение к перфорированной пластине и одновременно изменяет форму (см. рис. 3, б).

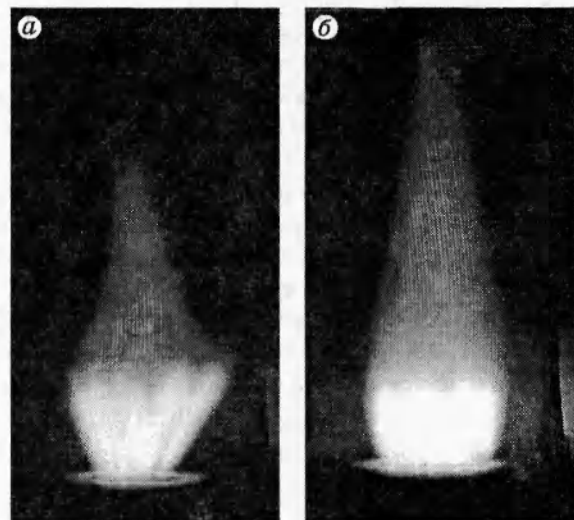


Рис. 3. Фотографии турбулентного пламени:
 пластина 6, $u = 0,9 \text{ м/с}$, $\alpha = 0,46$; $U = 0$ (а) и $0,9 \text{ кВ}$ (б)

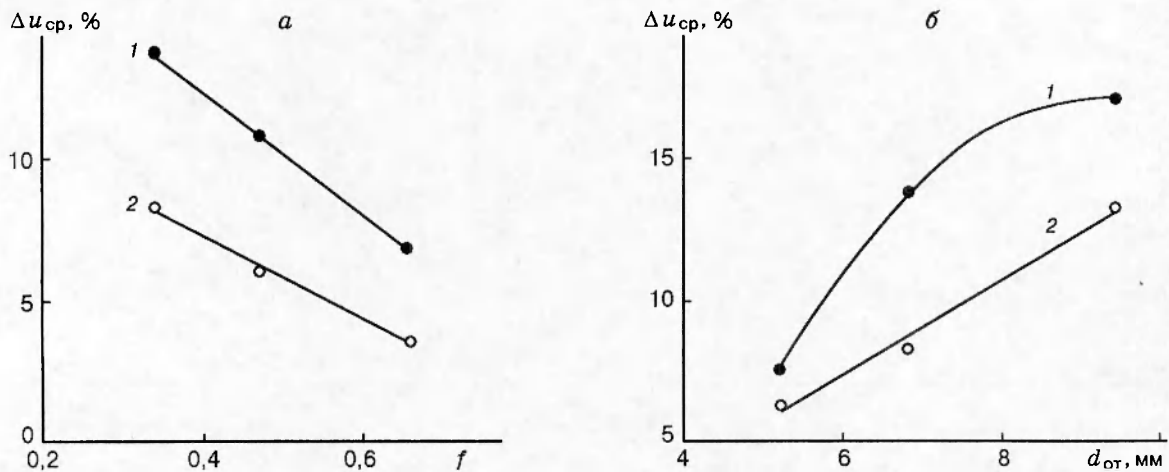


Рис. 4. Относительное увеличение скорости срыва при $n = 1 \text{ см}^{-2}$ (а) и $f = 0,34$ (б); $m_{\text{п}} = 0,08$ (1) и $0,1 \text{ г/с}$ (2)

С практической точки зрения представляет интерес анализ интенсифицирующего воздействия ВЭП на пламена с различными характеристиками турбулентности, которые обеспечиваются за счет применения перфорированных пластин с разным сочетанием $d_{\text{от}}$, n и f (см. таблицу). В качестве критерия сравнения используется относительное увеличение скорости срыва: $\Delta u_{\text{ср}} = (u_{\text{ср}} - u_{\text{ср},0})/u_{\text{ср},0}$, где $u_{\text{ср},0}$ — значение $u_{\text{ср}}$ при $U = 0$. Как следует из рис. 4, а, для пластин с одинаковой плотностью расположения отверстий эффективность воздействия ВЭП уменьшается с увеличением коэффициента живого сечения и массового расхода пропана. Это происходит вследствие того, что большие абсолютные значения $u_{\text{ср}}$ (см. рис. 1) обуславливают большую гидродинамическую турбулизацию потока (критерий Рейнольдса $Re \sim u_{\text{ср}}$). Поэтому характерное время пребывания элементарного объема топливной смеси оказывается недостаточным для воздействия ВЭП, и влияние ионного ветра на устойчивость пламени к срыву становится ограниченным. При использовании пластин с фиксированным значением f скорость срыва с ростом диаметра единичного отверстия возрастает на большую величину (рис. 4, б). Зависимость $u_{\text{ср}}$ от массового расхода пропана остается прежней.

Полученные данные нельзя объяснить только влиянием масштаба турбулентности, пропорционального диаметру отверстий. Действительно, при $n = \text{const}$ интенсифицирующее воздействие ВЭП с ростом $d_{\text{от}}$ уменьшает-

ся, а при $f = \text{const}$ — увеличивается. Поэтому для анализа результатов вводится дополнительный параметр перфорированной пластины $d_{\text{э.п}}$ — эквивалентный диаметр перемычки между тремя соседними отверстиями (см. таблицу). Поскольку установленная в потоке пластина является препятствием с достаточно большим коэффициентом гидродинамического сопротивления ($\xi \approx 13$ [9]), для анализа результатов используем аналогию с теорией стабилизации пламени за плохообтекаемым телом. Согласно [10] пламя стабилизируется за счет образования зон обратных токов. Причем чем больше их объем, тем надежнее осуществляется воспламенение свежей топливной смеси. В данном случае роль плохообтекаемого тела играют образованные соседними отверстиями перемычки, а их размер определяет объем области рециркуляции. При отрицательном потенциале горелки ионный ветер увлекает высокотемпературные продукты сгорания к пластине, увеличивая тем самым объем зоны обратных токов. В результате интенсифицируются процессы тепло- и массообмена между рециркуляционной зоной и обтекающим ее потоком топливной смеси. Из сопоставления данных таблицы и рис. 4 следует, что при возрастании f ($n = \text{const}$) и n ($f = \text{const}$) характерный размер перемычки в первом случае уменьшается, а во втором увеличивается, что обуславливает соответствующий характер зависимостей $\Delta u_{\text{ср}}$.

В экспериментах, когда на горелку подается положительный потенциал, ВЭП не влияет на форму пламени и скорость срыва. Зафикси-

рованный результат можно объяснить, исходя из следующих соображений. При данной полярности ионный ветер направлен от горелки и, следовательно, оказывает ингибирующее воздействие, а интенсифицирующее влияние ВЭП возможно только через кинетику предпламенных химических реакций [1, 2]. Причем для ламинарного пламени в работе [2] зарегистрировано повышение устойчивости пламени к срыву. Однако очевидно, что при горении в турбулентном потоке роль химической кинетики (являющейся передаточным звеном в системе ВЭП — пламя) уменьшается и превалирующими становятся процессы турбулентного смешения. Поскольку величина $u_{ср}$ не изменяется, можно сделать вывод о взаимной компенсации повышения реакционной способности топливной смеси и гасящего влияния ионного ветра. Заметим, кстати, что с изменением полярности ВЭП зарегистрировано уменьшение значения ионизационного тока в пламени с $100 \div 200$ до $7 \div 10$ мкА.

Полученные экспериментальные зависимости качественно согласуются с данными [2], где исследовалось ламинарное пламя. Однако при турбулентном горении воздействие ВЭП оказалась меньше, особенно при использовании сетчатого электрода большего диаметра d_c (рис. 5), когда уровень напряженности поля понижается.

Также не изменяется величина $u_{ср}$ и при наложении продольного поля, создаваемого между горелкой и кольцевым электродом

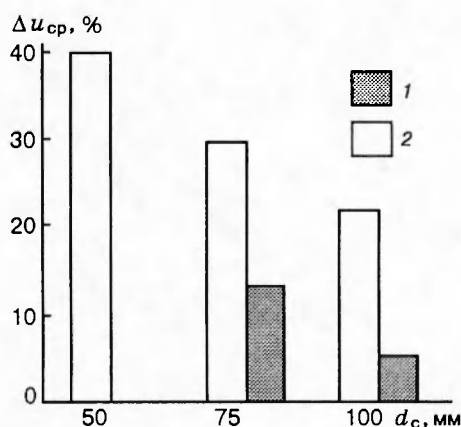


Рис. 5. Относительное увеличение скорости срыва пламени:

1 — пластина 3; 2 — ламинарное пламя, данные работы [2]

диаметром 75 мм, установленным соосно пластине на расстоянии $x = 0 \div 80$ мм от нее. Заметим, что для ламинарного пламени при $x = 50 \div 60$ мм значение $u_{ср}$ увеличивается не более чем на $\sim 14\%$ [2]. Зарегистрированные отличия связаны, как уже отмечалось, с тем, что возможности влияния ионного ветра и интенсификации химических реакций в турбулентном потоке ограничены.

Таким образом, исследования показали, что характер воздействия ВЭП на турбулентное пламя зависит от параметров турбулентности потока реагирующей смеси и особенностей выбранной схемы стабилизации пламени. Поскольку возрастание $u_{ср}$ в турбулентном потоке оказалось ниже, чем в ламинарном, в натурных энергетических установках повышение эффективности рабочего процесса за счет наложения ВЭП в целом также будет ниже (по сравнению с лабораторными горелками). Кроме того, не исключены изменения электрофизических свойств истекающих продуктов сгорания и электризация элементов конструкции, что, безусловно, также необходимо учитывать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шебеко Ю. Н. Влияние переменного электрического поля на нормальную скорость горения органических веществ в воздухе // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 4. С. 48–50.
2. Ягодников Д. А., Воронецкий А. В. Особенности стабилизации пропановоздушного пламени при наложении продольного и поперечного электрического поля // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 40–45.
3. Саламандра Г. Д. Распространение пламени в поперечном электрическом поле // Теплофизические свойства и газодинамика высокотемпературных сред. М.: Наука, 1972. С. 135–143.
4. Майоров Н. И. О механизме воздействия допобойного постоянного электрического поля на распространение пламени в трубах с изолированными электродами // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 5. С. 48–53.
5. Пантелеев А. Ф., Попков Г. А., Шебеко Ю. Н. и др. Влияние электрического поля на концентрационные пределы распространения пламени пропана в воздухе // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 1. С. 26–28.
6. Мещеряков Г. М., Бобков А. С., Харламов О. В. Изменение некоторых характеристик факела при приложении электрического

- поля // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем. Черногловка, 1986. С. 24–27.
7. **Черепнин С. Н., Дашевский В. Н.** Влияние внешнего электрического поля на параметры горения и электризацию сопла энергетической установки // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 74–78.
 8. **Чекел М. Д.** Измерения турбулентности, генерируемой перфорированными пластинами со степенью перфорации 40% // Теор. основы инж. расчетов. 1986. № 1. С. 213–229.
 9. **Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
 10. **Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей** / Б. В. Раушенбах, С. А. Белый, И. В. Беспалов и др. М.: Машиностроение, 1964.

*Поступила в редакцию 16/X 1996 г.,
в окончательном варианте — 5/I 1997 г.*
