

*А. Ф. Пантелеев, Г. А. Попков, Ю. Н. Шебеко,
С. Г. Цариченко, В. И. Горшков*

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ПРЕДЕЛЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРОПАНА В ВОЗДУХЕ

Экспериментально изучено влияние постоянного и переменного электрического поля на концентрационные пределы распространения пламени пропана в воздухе в вертикальной трубе с закрытым нижним и открытым верхним концом. Найдено, что пределы при распространении пламени снизу вверх и нижний предел при распространении пламени сверху вниз не изменяются при наложении электрического поля. Дана качественная интерпретация полученных результатов.

Известно, что электрическое поле может оказывать воздействие на различные характеристики горения органических соединений в воздухе (пределы стабилизации пламени на горелке, нормальная скорость горения, температура самовоспламенения, концентрационные пределы распространения пламени и т. д.). Наименее изучено влияние электрического поля на концентрационные пределы распространения пламени (КПР), а имеющиеся в литературе данные в этой области довольно противоречивы [1—5]. Так, в [1, 2] показано, что наложение относительно слабого электрического поля (потенциал от 50 до 1800 В) приводит к прекращению распространения пламени в богатых смесях ацетилена и этилена с воздухом, а результаты работ [3—5] свидетельствуют о том, что влияние поля на распространение пламени в смесях некоторых углеводородов с воздухом достаточно слабое. В связи с этим настоящее исследование посвящено экспериментальному рассмотрению влияния электрического поля на КПР пропана в воздухе.

Экспериментальная установка состояла из вертикального реакционного сосуда (кварцевая трубка с внутренним диаметром 50 и высотой 1000 мм), системы смешения газов и подачи их в реакционный сосуд, электродов для наложения на горючую смесь и распространяющееся пламя электрического поля, источника зажигания и высоковольтного источника напряжения. Созданную после смешения в проточном смесителе пропановоздушную смесь подавали в нижнюю часть реакционного сосуда и выпускали через открытый верхний торец. Смесь зажигали накаливаемой спиралью в нижней или в верхней части сосуда (на расстоянии 50 мм от верхнего торца вниз). Электрическое поле создавали подачей напряжения (постоянного или переменного с частотой 50 Гц) на металлическую сетку цилиндрической формы диаметром 80 и высотой 300 мм, расположенную коаксиально с реакционным сосудом в верхней его части.

Ток проводимости не превышал во всех опытах (до пробоя) 1 мА. По оси реакционного сосуда расположен заземленный металлический стержень диаметром 5 мм. Типичная величина расхода газовой смеси составляла 10 дм³/мин, что соответствует скорости движения газа через реакционный сосуд ~8 см/с. Эксперименты показали, что варьирование расхода от 5 до 12 дм³/мин не приводит к изменениям результатов опытов. Относительная погрешность задания состава смеси не превышала 5%. Погрешность задания напряжения составляла ±1 кВ.

Оказалось, что при зажигании горючей смеси в нижней части реакционного сосуда наложение постоянного любой полярности или переменного потенциала от 0 до 47 кВ не приводит в пределах ошибки эксперимента к изменению и нижнего (НКПР), и верхнего (ВКПР) концентрационного предела распространения пламени. Одна из вероятных причин этого состоит в быстром проскоке пламени от закрытого нижнего к открытому верхнему концу реакционного сосуда, в результате

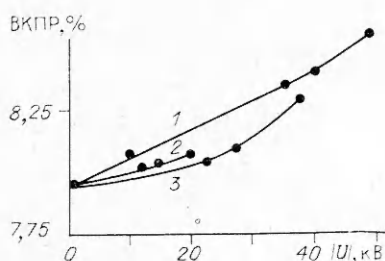


Рис. 1. Зависимость ВКПР пропана от U .
1, 3 — отрицательный потенциал; 2 — положительный потенциал.

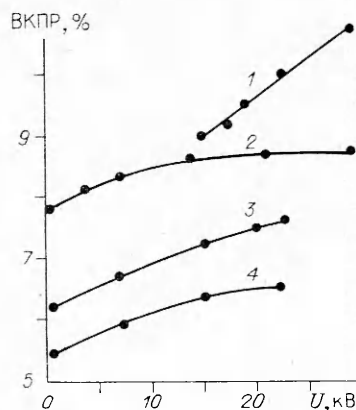


Рис. 2. Зависимость ВКПР пропана в воздухе (1, 2) и в азотновоздушной окислительной среде (3, 4) при распространении пламени сверху вниз (1) и для проскока пламени (2) от U . Расход воздуха 10 дм³/мин. Расход азота 2 (3) и 3,5 (4) дм³/мин.

чего на поверхности пламени не успевают развиваться заметные газодинамические возмущения за счет «ионного ветра» или реализоваться какой-либо иной вид воздействия поля на процесс горения.

При зажигании горючей смеси в верхней части реакционного сосуда пламя распространяется в случае околопредельного состава сверху вниз относительно медленно (видимая скорость пламени 10 см/с) и имеет почти плоскую форму, совершая небольшие колебания как целое с частотой 0,5—1 Гц относительно горизонтальной оси, угол поворота которой по отношению к вертикали произволен. При распространении пламени в электрическом поле на его поверхности появляются газодинамические возмущения, вызванные «ионным ветром», существенные при постоянном и едва заметные при переменном напряжении. Наложение потенциала (положительного, отрицательного, переменного) от 0 до 47 кВ не привело (в пределах ошибки эксперимента) к изменению НКПР относительно распространения пламени сверху вниз. Иная картина наблюдалась в случае верхнего предела.

На рис. 1, 1, 2 представлена зависимость ВКПР (объемное содержание пропана) при распространении пламени сверху вниз от величины приложенного постоянного электрического потенциала U . Наблюдается монотонный рост ВКПР с увеличением U при положительном и отрицательном потенциалах, хотя отрицательный потенциал оказывается более эффективным с точки зрения влияния на ВКПР.

Интересный эффект наблюдали в том случае, когда вначале зажигали околопредельную горючую смесь и лишь затем накладывали электрическое поле. После зажигания запредельной смеси пламя не оказывалось способным к распространению сверху вниз и в силу того, что смесь была богатой, у верхнего торца реакционного сосуда образовывалось диффузионное пламя. Если в этом случае к сетчатому электроду прикладывали напряжение, то при определенной величине U наблюдался проскок пламени от верхнего торца сосуда вниз (практически до нижнего торца). Таким образом, может быть для заданной величины U определена величина ВКПР относительно проскока пламени сверху вниз. Из рис. 1, 3 видно, что наблюдается рост ВКПР с увеличением U , хотя этот рост менее значителен, чем при зажигании смеси после наложения электрического поля.

На рис. 2 представлены аналогичные зависимости ВКПР от потенциала U в случае переменного напряжения частотой 50 Гц. Как и в случае постоянного потенциала, ВКПР растет вместе с U , причем переменное напряжение заметно более эффективно, чем постоянное.

Исследовано влияние переменного электрического поля на ВКПР в случае разбавления пропановоздушной смеси азотом (см. рис. 2). С уве-

личением степени разбавления горючей смеси азотом величина ВКПР при фиксированном U падает, однако при заданном расходе азота верхний предел растет с увеличением подаваемого на сетчатый электрод потенциала. При этом относительная скорость роста ВКПР с увеличением U приблизительно та же, что и без разбавления азотом (так, при увеличении U до 20 кВ и в том и в другом случае наблюдается относительный рост ВКПР на 20—23 %).

Вероятное качественное объяснение наблюдаемых эффектов состоит в следующем. В случае зажигания горючей смеси после наложения потенциала электрическое поле воздействует на пламя при малой вкладываемой мощности по крайней мере по двум механизмам: 1) посредством «ионного ветра» и 2) путем воздействия поля на химические процессы во фронте пламени [6]. Один из наиболее вероятных путей влияния поля на химическую кинетику горения описан в [7]. При соответствующих значениях E/N (E — напряженность электрического поля, N — концентрация молекул азота в смеси) происходит эффективное возбуждение электронами колебательных уровней молекул N_2 (до 90 % энергии разряда идет на колебательное возбуждение). В процессах колебательно-колебательного обмена молекулы азота могут передавать энергию возбуждения к другим молекулам горючей смеси (например, молекулам O_2 или другим частицам, реакции которых существенны для химической кинетики пламени). Колебательное возбуждение указанных частиц приводит к ускорению химических реакций и горения в целом, что и вызывает рост ВКПР. Данные представления позволили объяснить наблюдаемые в опытах [8—10] эффекты.

По аналогичному механизму реализуется, вероятно, и проскок пламени сверху вниз после наложения электрического поля. В этом случае возбуждение молекул N_2 происходит в зоне подготовки фронта пламени электронами, диффундирующими туда из зоны горения [11].

Представленное выше качественное объяснение наблюдаемых эффектов является, безусловно, приближенным и нуждается в дальнейшем обосновании. С его помощью прямо нельзя объяснить отсутствие влияния электрического поля на НКПР и большую эффективность отрицательного потенциала по сравнению с положительным (на рис. 1, по-видимому, различие кривых обусловлено «ионным ветром»). В связи с этим исследование в данной области целесообразно продолжить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скалов Б., Соколик А. Роль электрически заряженных частиц в распространении пламени. 1. Распространение пламени в поперечном электрическом поле // ЖФХ.— 1934.— 5, № 5.— С. 677.
2. Малиновский А. Э. Роль заряженных частиц в процессах горения и взрыва // Социалистическая реконструкция и наука.— 1934.— № 7.— С. 24.
3. Inomata T., Okazaki S., Meriwaki T. et al. The application of silent electric discharges to propagating flames // Comb. Flame.— 50, N 3.— P. 361.
4. Jagers H. C., Von Engel A. The effect of electric fields on the burning velocity of various flames // Ibid.— 1971.— 16, N 3.— P. 275.
5. Jagers H. C., Bowser R. J., Weinberg F. J. The effect of electric fields on burning velocity // Ibid.— 1972.— 19, N 1.— P. 135.
6. Степанов Е. М., Дьячков Б. Г. Ионизация в пламени и электрическое поле.— М.: Металлургия, 1968.
7. Шебеко Ю. Н. Влияние переменного электрического поля на нормальную скорость горения органических веществ в воздухе // ФГВ.— 1982.— 18, № 4.— С. 48.
8. Tewari G. P., Wilson J. R. On experimental study of the effects of high frequency electric fields on laser-induced flame propagation // Comb. Flame.— 1975.— 24, N 2.— P. 159.
9. Гуляев Г. А., Попков Г. А., Шебеко Ю. Н. Об эффектах синергизма при совместном действии электрического поля и инертного разбавителя на газофазные пламена // ФГВ.— 1987.— 23, № 2.— С. 57.
10. Гуляев Г. А., Попков Г. А., Шебеко Ю. Н. и др. Исследование совместного действия инертного разбавителя и электрического поля на газофазные пламена // ФГВ.— 1988.— 24, № 6.— С. 66.
11. Фиалков А. Б., Фиалков Б. С. Ионный состав пламен пропан-бутан — воздух при пониженном давлении // ФГВ.— 1985.— 21, № 3.— С. 32.

г. Балашиха

Поступила в редакцию 22/1 1990,
после доработки — 7/IV 1990