

УДК 533.92.536.46

Д.А. Ягодников, А.В. Воронцовский

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ

Приводится обзор опубликованных результатов экспериментальных исследований влияния внешнего допробойного электрического поля на характеристики воспламенения и горения. Анализ представленного материала позволил выявить общие закономерности и особенности электрофизических аспектов горения различных топливных композиций в зависимости от конкретных условий их практического применения.

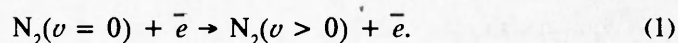
В работах [1—5] установлено, что процесс горения различных топливных композиций сопровождается ионизацией молекул (в основном за счет хемоионизации) и пространственным разделением положительных и отрицательных зарядов, концентрации которых во фронте пламени (ФП) превышают равновесные значения. Это обусловило интерес к изучению воздействия внешнего электрического поля (ВЭП) на процессы воспламенения и горения с целью использования обнаруженного эффекта для повышения эффективности энергетических установок. К настоящему времени по данному вопросу получен достаточно большой объем эмпирических данных, анализ которых проведен в предлагаемой работе. Принимая во внимание ограниченность объема публикации, рассмотрены только те способы наложения ВЭП, когда между электродами не реализуется электродуговой разряд.

Физическая природа воздействия ВЭП на пламя

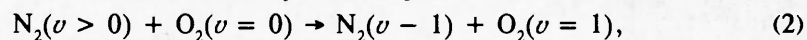
При наложении на пламя ВЭП достаточной интенсивности возникает направленное движение присутствующих в зоне горения ионов и электронов. При этом электрофизическое воздействие ВЭП может быть обусловлено ионным ветром, непосредственным влиянием на кинетику химических реакций, а также выделением джоулева тепла.

За счет воздействия ВЭП присутствующие в пламени ионы начинают двигаться к противоположно заряженным электродам (ионный ветер). Известно, что при горении предварительно перемешанных смесей [3] в зоне предпламенных реакций отмечается наибольшая концентрация положительных ионов, а с внешней стороны голубого конуса пламени преобладают отрицательные ионы. Поэтому если на горелку подается отрицательный потенциал, положительные ионы перемещаются во внутреннюю часть пламени, а отрицательные — во внешнюю. Ионный ветер при этом совпадает с направлением движения положительных ионов, поскольку они обладают существенно меньшей подвижностью [1]. Ионный ветер увлекает высокотемпературные продукты сгорания в зону предпламенных реакций, что интенсифицирует процесс воспламенения топливной смеси. В случае обратной полярности ВЭП ионный ветер имеет противоположное направление, в результате устойчивость пламени уменьшается, т.е. ВЭП оказывает ингибирующее воздействие.

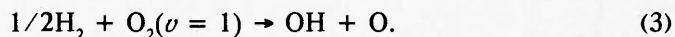
Прямое влияние ВЭП на кинетику химических реакций возможно за счет возбуждения колебательных уровней молекул азота при столкновении их с электронами, диффундирующими за счет высокой подвижности из зоны горения в область предпламенных реакций [6, 7]:



Возбужденная молекула азота может передать часть энергии другим компонентам смеси, в частности, молекула кислорода



что приводит к увеличению скорости реакций разветвления в пламени, например



Кроме рассмотренных выше факторов, строго говоря, следует также учитывать возможность выделения джоулева тепла при воздействии ВЭП на пламя. Однако максимальная величина силы тока (до пробоя) в пламени составляет 1 мА при разности потенциалов между электродами до 40 кВ [8, 9]. Это означает, что максимальное значение выделяющейся мощности (~40 Вт) существенно ниже тепловыделения за счет химических реакций. Поэтому непосредственное тепловое воздействие ВЭП на характеристики воспламенения и горения пренебрежимо мало.

Влияние ВЭП на процессы воспламенения

На практике для количественной оценки эффективности процессов воспламенения, как правило, используются следующие параметры: температура воспламенения T_v ; верхний и нижний концентрационные пределы распространения пламени (ВКПР, НКПР); скорость распространения пламени w_f .

Так, в работе [7] исследовалось воспламенение капель (0,1 мл) органических горючих, подаваемых в стеклянную колбу, помещенную в заземленный термостат. Вторым электродом служила нихромовая нить диаметром 1 мм, размещенная на оси колбы. В случае подачи на нить положительного напряжения ($U = 3,8$ кВ) значение T_v увеличивалось для всех типов горючих (см. таблицу), поскольку при этом отрицательные ионы перемещаются к центральному электроду, где рекомбинируют. Тогда, согласно (3), уменьшается вероятность реализации реакций разветвления в пламени, что приводит к снижению скорости окисления органических веществ и, как следствие, к росту T_v .

Перейдем далее к анализу результатов по влиянию ВЭП на верхний и нижний концентрированные пределы распространения пламени. В работе [8] исследовался процесс распространения пламени пропановоздушной смеси в кварцевой трубе диаметром 50 мм и длиной 1 м. Электрическое поле создавалось между заземленным электродом, установленным по оси трубы, и сетчатым экраном, расположенным с внешней стороны последней. Показано, что для случая распространения пламени от нижнего закрытого конца трубы к открытому верхнему наложение как постоянного, так и переменного ВЭП ($U = 0 \div 47$ кВ) не приводит к изменению концентрационных пределов. Полученный результат объясняется тем, что при данной схеме эксперимента (когда расширяющиеся продукты сгорания воздействуют на пламя) значение w_f достаточно велико (~50 м/с), а фронт пламени турбулизирован, т.е. возможность дополнительной интенсификации процесса за счет воздействия ВЭП ограничена.

Горючее	T_v, K	
	без поля	с полем
Керосин осветительный	519	595
Дизельное топливо	520	573
Бензин БР-2	571	618
Петролейный эфир	533	577

При поджигании смеси у открытого торца трубы пламя равномерно распространялось с видимой скоростью $\sim 0,1$ м/с. Визуальные наблюдения свидетельствуют о плоской форме фронта при концентрациях пропана, близких к НКПР и ВКПР. Однако при подаче на сетчатый экран постоянного напряжения на поверхности пламени появлялись возмущения, скорость распространения ФП возрастала и ВКПР (объемная доля пропана g_n) смещался в сторону переобогащенной смеси (рис. 1). Увеличение g_n авторы объясняют как воздействием ионного ветра, приводящим к появлению гидродинамических возмущений на поверхности фронта, так и прямым влиянием ВЭП на кинетику химических реакций.

В случае использования переменного напряжения (рис. 1,3) возмущения пламени оказывались менее значительными, скорость ФП росла не так интенсивно и ВКПР увеличивался на $\sim 11\%$ (вместо $8,5\%$). На этом же графике представлены результаты эксперимента, в котором наложение ВЭП происходило уже после воспламенения топливной смеси. Показано, что при этом возможна реализация высокоскоростного режима горения с проскоками пламени. В этом случае эффективность воздействия ВЭП снижалась (рис. 1, 4). Кроме того, при исследовании закономерностей распространения бедных пламен авторами установлено, что ВЭП практически не влияет на величину НКПР.

Результаты работы [8] позволяют сделать два принципиальных вывода. Во-первых, влияние ВЭП на ВКПР наиболее эффективно при ламинарном режиме распространения пламени. В этом случае характерное время пребывания элементарного объема топливной смеси в ФП оказывается достаточным для реализации воздействия ВЭП в соответствии с описанными выше механизмами. Во-вторых, поскольку полярность прикладываемого напряжения практически не влияет на увеличение g_n , то при подаче на сетку отрицательного потенциала интенсифицирующее воздействие ВЭП объясняется, вероятно, ионным ветром, направленным из зоны продуктов сгорания к сетке. При изменении полярности ионный ветер меняет направление, и преобладающим становится воздействие ВЭП на кинетику химических реакций, поскольку при этом свободные электроны перемещаются из ФП в зону прогрева, где интенсифицируют кинетику химических реакций, согласно (1) — (3).

Детальное исследование влияния ионного ветра на процессы воспламенения выполнено в [10], где проанализированы закономерности стабилизации пламени предварительно перемешанной смеси пропан-бутана с воздухом на срезе заземленной горелки с диаметром сопла 10 мм при наложении электрического поля, создаваемого между горелкой и электродом диаметром 70 и высотой 700 мм, изготовленным из металлической сетки с размером ячейки 1×1 мм. При подаче на электрод отрицательного потенциала периодически изменялась форма поверхности пламени. С изменением полярности форма ФП оставалась практически постоянной. В качестве

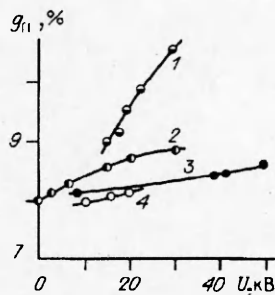


Рис. 1. Влияние ВЭП на верхний концентрационный предел распространения пламени. Переменное напряжение: 1 — равномерное распространение; 2 — проскок ФП; 3 — $+U$, 4 — $-U$.

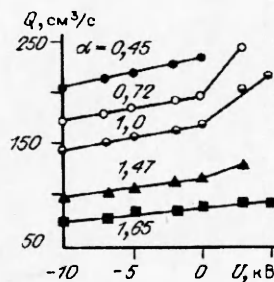


Рис. 2. Зависимость $Q(U)$.

параметра, характеризующего устойчивость пламени, принят предельный объемный расход смеси Q , при котором происходит срыв пламени. Установлено, что положительное напряжение улучшает условия стабилизации, а отрицательное — уменьшает устойчивость пламени (рис. 2). Обращает внимание увеличение Q с уменьшением коэффициента избытка окислителя α , что обусловлено, видимо, влиянием атмосферного воздуха при горении богатых смесей. Полученный результат авторы объясняют тем, что при приложении к сетке положительного потенциала ионный ветер направлен к соплу горелки и интенсифицирует процесс воспламенения. В случае обратной полярности ионный ветер имеет противоположное направление, в результате чего устойчивость пламени уменьшается.

В [11] изучалась стабилизация предварительно перемешанной смеси *n*-бутана с воздухом в продольном ВЭП, которое создавалось между заземленной горелкой и кольцевым электродом, установленным на высоте 100 мм над срезом горелки. Как видно из рис. 3, в случае приложения к кольцевому электроду положительного напряжения предельный объемный расход смеси увеличивается в 2—7 раз. Полученный результат авторы объясняют влиянием ионного ветра. Отметим, что авторы работ [10, 11] расходятся во мнении относительно предпочтительности продольного или поперечного ВЭП, хотя повышение стабильности пламени зарегистрировано в обоих случаях.

Изучение воздействия ВЭП на кинетику химических реакций проводилось также в [12, 13]. Отличие заключалось только в том, что на сетчатый экран всегда подавалось отрицательное напряжение, что обусловлено необходимостью исключить стабилизирующее влияние ионного ветра. Кроме того, в топливную смесь добавляли инертный газ (азот или аргон). Разбавление смеси приводило к снижению температуры и скорости горения топлива, т.е. оказывало ингибирующее воздействие на пламя. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при наложении ВЭП срыв пламени происходит при существенно большем расходе разбавителя — азота (рис. 4). Последнее подтверждает влияние ВЭП на кинетику химических реакций (1) — (3), а следовательно, и на процесс стабилизации пламени. Установлено также, что при прочих равных условиях с повышением прикладываемого напряжения для срыва пламени требуется существенно большая степень его разбавления азотом. Этот факт можно объяснить ростом напряженности ВЭП и подвижности электронов и возбужденных молекул азота. Из графика также следует, что интенсивность воздействия ВЭП практически не изменяется с увеличением скорости газа на срезе горелки. Так, при $w_f = 2,5$ и $4,5$ м/с предельное значение Q_{N_2} увеличивается в обоих случаях на ~34 % ($U = 15$ кВ).

Когда в качестве разбавителя применялся аргон, зарегистрировано уменьшение Q_{Ar} , поскольку концентрация диффундирующих к зоне реакции возбужденных молекул азота, видимо, мала для того, чтобы компенсировать снижение температуры горения и негативное воздействие ионного ветра. При

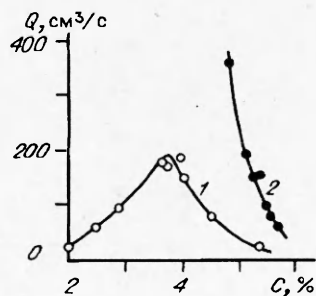


Рис. 3. Зависимость Q от объемного содержания *n*-бутана C .
1 — $U = 0$; 2 — $U = 15$ кВ.

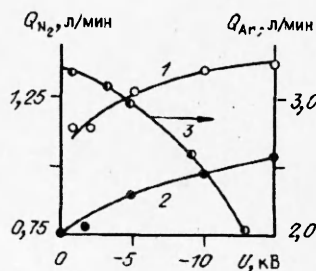


Рис. 4. Влияние ВЭП на предельный расход разбавителя.
Азот, $\alpha = 1,25$, w_f , м/с: 1 — 2,5, 2 — 4,5, 3 — диффузионное пламя (аргон).

этом авторы отмечают, что совместное воздействие ВЭП и аргона оказывает большее ингибирующее влияние на стабилизацию пламени, чем воздействие этих факторов по отдельности (т.е. имеет место так называемый положительный синергизм).

Аналогичный результат получен и в случае стабилизации диффузионного пламени пропан-бутана [13]. С увеличением отрицательного потенциала наблюдалось уменьшение предельной степени разбавления смеси аргоном (рис. 4, 3). В связи с этим авторы предположили, что механизм возбуждения молекул играет существенную роль лишь в низкотемпературной зоне ФН, где имеются молекулы горючего и окислителя. В низкотемпературной зоне диффузионного пламени имеет место либо недостаток окислителя (и молекул азота), либо недостаток горючего. Следовательно, в диффузионных пламенах возможности интенсификации процессов воспламенения путем воздействия ВЭП ограничены.

С практической точки зрения несомненный интерес представляют результаты по изучению воздействия электрического поля на скорость распространения ФН, приведенные в работах [14—17]. Методика проведения экспериментов и описание установки представлены в [14]. Рабочий участок выполнен в виде трубы квадратного сечения 36×36 мм, в переднюю и заднюю стенки которой вмонтированы прозрачные элементы из кварца. Для создания поперечного электрического поля электроды устанавливались внутри стенок (изолированные электроды) либо заподлицо со стенками трубы (неизолированные электроды), на один из электродов подавалось напряжение отрицательной полярности, а другой заземлялся. В качестве топлива использовалась стехиометрическая метановоздушная смесь, поджигаемая у открытого конца трубы (для реализации равномерного режима распространения пламени). Процесс распространения пламени визуализировался методом Теплера и регистрировался кинокамерой СКС-1 со скоростью до 3600 кадр/с.

Установлено [15], что наложение ВЭП привело к возникновению возмущений на поверхности фронта вблизи отрицательно заряженного изолированного электрода и сопровождалось увеличением «вытянутости» фронта пламени H (расстояние между передней и задней границами пламени по оси трубы). При этом значение H тем выше, чем больше продолжительность воздействия ВЭП (рис. 5). Авторы также указывают на десятикратное увеличение скорости распространения пламени. Данный результат объясняется электрогидродинамическим характером воздействия ВЭП на зону горения (за счет ионного ветра).

В работе [16] приводятся данные по относительному увеличению скорости распространения пламени w_r/w_s^0 для различных значений α и прикладываемого к электродам напряжения (рис. 6). Характер зависимости $w_r(U)$ аналогичен описанному выше. Обращает на себя внимание тот факт, что в богатых смесях наблюдается менее значительная интенсификация процесса распространения пламени, чем в бедных. Так, для обеспечения эквивалентного увеличения w_r при $\alpha = 1,83$ и $0,77$ необходимо к электродам при-

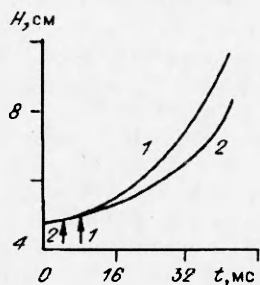


Рис. 5. Изменение вытянутости пламени по времени. Стрелки — момент отключения напряжения. $\alpha = 1$, $U = 20$ кВ. Время воздействия поля, мс: 1 — 7,5, 2 — 3,7.

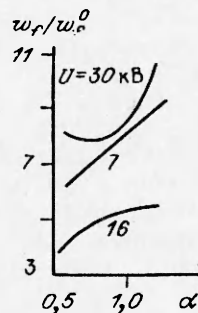


Рис. 6. Относительное увеличение скорости пламени.

ложить напряжение 12 и 24 кВ соответственно. Данный результат можно объяснить тем, что помимо ионного ветра определенное влияние на рост скорости пламени оказывает возбуждение молекул азота и активных радикалов. В связи с тем, что в бедных смесях содержание азота выше, влияние ВЭП на процесс распространения пламени оказывается более заметным.

Изучению влияния ВЭП на распространение пламени в трубах с неизолированными электродами посвящена работа [17]. Анализ теплеграмм позволил установить, что и в этом случае при наложении ВЭП возникали возмущения, наиболее отчетливо выраженные в области фронта пламени, примыкающей к отрицательному электроду. Отличительная особенность процесса распространения заключалась в появлении периодических пробоев между задней границей фронта и положительным электродом. В результате сокращается вытянутость (после пробоя величина H опять возрастает) и замедляется темп роста w_f . Причем сила тока в момент пробоя существенно возрастала (с 0,3 до 1,9 мА), а интервал их следования ~ 15 мс. Таким образом, в установке с неизолированными электродами увеличение w_f оказывается меньшим, чем в установке с изолированными электродами. Это обусловлено незначительным увеличением площади ФП, причем как за счет уменьшения количества возмущений, так и за счет периодических пробоев между пламенем и электродами.

Влияние ВЭП на процессы горения

Большой практический интерес представляют данные по влиянию ВЭП на характеристики горения топливных композиций. В качестве определяющих параметров процесса горения обычно используют температуру горения и нормальную скорость пламени u_n [1]. Следует отметить, что в [10—17] регистрировалась видимая скорость распространения фронта пламени либо измерялся объемный расход топливной смеси, при котором происходил срыв пламени.

В [18] исследовался процесс распространения сферического фронта пламени в метановоздушной смеси. Для создания ВЭП пользовались электроды, расположенные на расстоянии 22 мм ($f = 6$ МГц, напряженность поля $E = 1,67$ кВ/см). Установлено, что при воздействии ВЭП видимая скорость пламени увеличилась в 1,7—1,9 раза (рис. 7). Величина u_n находилась по известному из теории ламинарного сферического пламени соотношению

$$u_n = w_f \frac{T_0}{T^*},$$

где T_0 , T^* — начальная температура и температура горения топлива. Величина T^* определялась на основе термодинамического расчета горения метана с воздухом.

Из рис. 7 видно, что воздействие ВЭП приводит к росту u_n . Полученный результат авторы объясняют влиянием ионного ветра, который способствует увеличению коэффициента тепло- и массообмена между зонами горения и предпламенных реакций. Однако при исследовании горения смеси метана, кислорода и аргона при наложении ВЭП скорость распространения пламени не увеличивалась. Это говорит о том, что помимо ионного ветра электрическое поле интенсифицирует химические реакции за счет возбуждения молекул азота. Данный вывод подтверждает серия экспериментов по изучению влияния ВЭП на распространение пламени в водородно-воздушных смесях. Поскольку в этом случае плотность электронов на 6 порядков ниже, чем в метановоздушной смеси, возбуждение молекул азота менее вероятно, и видимая скорость распространения пламени увеличивается всего на 5—10 %.

В [19] рассматривалось влияние электрического поля на массовую скорость горения m_r распыленного жидкого топлива. Из рис. 8 видно, что зависимость $m_r(U)$ близка к параболической, причем наибольшее увели-

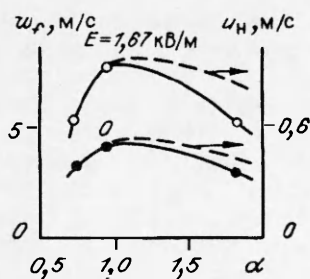


Рис. 7. Зависимость ω_f и i_n от α .

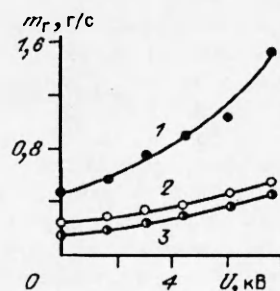


Рис. 8. Скорость горения жидких горючих.
1 — бензин; 2 — нефть; 3 — керосин.

чение m_f реализуется при горении бензина. В [19] также зарегистрирована интенсификация процесса распыления при наложении ВЭП за счет электризации капель горючего.

Влияние внешнего электрического поля на температуру горения изучалось в работах [9, 20, 21]. В [20] приведены результаты испытаний экспериментальной двигательной установки (горючее — пропан-бутан, окислитель — воздух), в которой ВЭП создавалось между заземленной цилиндрической камерой сгорания (диаметр 40, длина 300 мм) и электродом, установленным на оси последней со стороны смесительной головки. Интенсифицирующее воздействие ВЭП наблюдалось при подаче на электрод положительного напряжения. Показано, что по мере увеличения E растет полнота сгорания топлива и, как следствие, температура продуктов сгорания на срезе сопла. Причем относительное увеличение \bar{T} имеет экстремум при $E \sim 250$ кВ/м (рис. 9). По мнению авторов, это происходит потому, что при наложении электрического поля на область предпламенных реакций имеет место не влияние ионного ветра, а прямое воздействие ВЭП на кинетику химических реакций. Однако в работе [20] отсутствуют какие-либо сведения по взаимному расположению форсунок горючего и окислителя, поэтому предложенное объяснение нельзя считать убедительным.

В работе [9] исследовалось горение аэрозолей керосина марки Т-6 во ВЭП (постоянное напряжение 50 кВ), которое создавалось между струйной форсункой и коническим стабилизатором пламени. Регистрируемые параметры — относительная осевая длина пламени и температура. Если ВЭП было направлено по потоку (положительный потенциал на форсунке), сокращались осевые размеры пламени до 40 % (при $E = 10^6$ В/м) и высокотемпературная зона пламени смещалась против потока (рис. 10, R — расстояние от оси факела). При изменении полярности ВЭП длина пламени возрастала на 45 %, а область максимальных температур смещалась по потоку. Отметим, что увеличение α от 0,8 до 1,2 практически не оказывало влияния на характеристики горения. Максимальная величина силы тока, зарегистрированная при воздействии ВЭП, составила ~ 20 мкА. Интенсификация процесса горения при наложении ВЭП по потоку объясняется

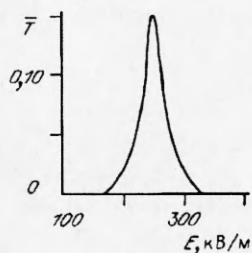


Рис. 9. Относительное увеличение температуры продуктов сгорания.

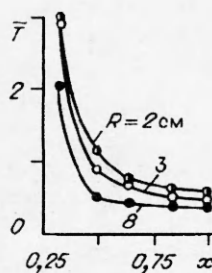


Рис. 10. Профиль относительных температур.

только его непосредственным влиянием на кинетику химических реакций, поскольку ионный ветер направлен также по потоку в сторону продуктов сгорания и оказывает ингибирующее воздействие.

Определенный интерес представляют данные [21] по влиянию ВЭП на горение пропана в жаровых трубах, используемых для нагрева воды. Электрическое поле создавалось между пропановой горелкой и заземленной жаровой трубой. Установлено, что наложение ВЭП приводит к интенсификации процесса передачи тепла от продуктов сгорания к воде. Причем наибольший прирост теплоотдачи (до 18,8 %) наблюдается в случае подачи на горелку положительного потенциала 8 кВ. При этом температура продуктов сгорания на выходе из жаровой трубы увеличилась с 310 ($U = 0$) до 331 К ($U = 6$ кВ). Полученные результаты объясняются влиянием ВЭП на кинетику химических реакций, вследствие чего уменьшается энергия активации молекул и увеличивается скорость горения топлива. Эти факторы приводят к снижению потерь тепла за счет недогорания топлива. Максимальная выделяемая электрическая мощность при наложении ВЭП на пламя составляет $\sim 0,1$ Вт (напряжение 6 кВ, ток 17 мкА), что согласуется с данными [8, 9, 17].

Влияние ВЭП на характеристики воспламенения и горения газозвесей частиц твердого горючего, в частности порошкообразных металлов, исследовалось в ограниченном числе работ. Так, в [22] изучалось горение частиц алюминия диаметром $d = 45$ мкм в пропановоздушном пламени при воздействии поперечного электрического поля. Зарегистрирован дрейф частиц конденсированного оксида алюминия вдоль силовых линий поля и их конвективный перенос газовым потоком. При определенном уровне напряженности ВЭП частицы к-фазы ($d < 1$ мкм) достигали электродов. Причем концентрация частиц к-фазы на аноде была на 2 порядка больше, чем на катоде. Это говорит о том, что конденсированный оксид алюминия ионизируется преимущественно за счет прилипания к их поверхности электронов, в результате чего частицы приобретают отрицательный заряд. Ионизация за счет термоэлектронной эмиссии незначительна, по-видимому, за счет большой работы выхода электрона.

В работе [23] исследовалось горение одиночной частицы магния с $d = 2 \div 5$ мм между плоскими электродами, на которые подавалось постоянное напряжение 1—4 кВ. При этом часть конденсированного оксида магния оседала на поверхности частицы магния, а часть — на электродах. Результаты исследований показали, что положительно заряженные частицы к-фазы образуются во внутренней зоне конденсации, а отрицательные — во внешней. Поскольку количество оксида магния на поверхности меньше, чем в зоне конденсации, то и величина суммарного отрицательного заряда больше, чем положительного (см. ниже):

Диаметр частицы к-фазы, мкм	Знак заряда	Суммарный заряд, 10^{-9} Кл
0,075	+	9—10
0,34	-	800—1000

Большая подвижность положительно заряженных частиц к-фазы объясняется тем, что их масса меньше, чем отрицательных. Однако обе величины существенно меньше коэффициентов подвижности положительных ионов и электронов.

Выводы

Проведенные исследования показали возможность воздействия с помощью ВЭП на основные характеристики процессов воспламенения и горения топливных композиций. Установлено, что ВЭП может приводить к изменению температуры и верхнего концентрационного предела воспламенения горючего, расширению диапазона устойчивости пламени, изменению

скорости и температуры горения топлива. При определенных условиях возможно ингибирование ВЭП процессов воспламенения и горения.

Основными факторами, объясняющими воздействие ВЭП на процессы воспламенения и горения, являются ионный ветер и изменение кинетики химических реакций. Степень влияния каждого из них зависит от полярности прикладываемого напряжения, типа используемого топлива, конструктивных особенностей камеры сгорания и др.

Имеющиеся экспериментальные данные в ряде случаев существенно отличаются, а иногда даже противоречат друг другу. Например, в работах [3, 10] утверждается, что эффективность воздействия ВЭП выше в богатых смесях, в [16] зарегистрирован противоположный результат, а в [18, 21] показано, что воздействие ВЭП примерно одинаково как в бедных, так и в богатых смесях. Практически отсутствуют данные, касающиеся непосредственных измерений нормальной скорости пламени, что можно объяснить изменением формы фронта пламени при наложении ВЭП. Оценки u_n у разных авторов также противоречивы. В [3] указано, что u_n в ВЭП уменьшается на 10—15 %, в [18] — увеличивается в 1,5—2 раза, в [16] — практически не изменяется. Поэтому не вызывает сомнения актуальность проведения дальнейших исследований с целью разрешения указанных противоречий.

Влияние ВЭП на горение газодисперсных систем практически не изучено, что связано, по всей видимости, с усложнением методики проведения эксперимента. Однако принимая во внимание перспективность использования частиц твердого горючего в различного рода энергетических установках, необходимость получения эмпирических данных по электрофизике горения газодисперсных систем очевидна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаутон Д., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. — М.: Энергия, 1976. — 296 с.
2. Кидин Н.И., Либрович В.Б. О собственном электрическом поле ламинарного пламени // ФГВ. — 1974. — 10, № 5. — С. 696—705.
3. Фиалков Б.С., Щербаков Н.Д., Ботова В.И. и др. // Структура собственного электрического поля пламени: Исследование процессов неустойчивого горения. — Чебоксары: ЧГУ, 1984. — С. 53—70.
4. Черепнин С.Н. Исследование электрических явлений в камерах сгорания реактивных двигателей // ФГВ. — 1990. — 26, № 2. — С. 58—59.
5. Головкин В.В., Козицкий С.В., Флорко А.В. Электрическое поле горячей одиночной частицы магния // Там же. — 1985. — 21, № 4. — С. 27—32.
6. Шебеко Ю.Н. Влияние переменного электрического поля на нормальную скорость горения органических веществ в воздухе // Там же. — 1982. — 18, № 4. — С. 48—50.
7. Гуляев Г.А., Попков Г.А., Шебеко Ю.Н. Влияние электрического поля на температуру самовоспламенения органических веществ в воздухе // Там же. — 1985. — 21, № 4. — С. 25—27.
8. Пантелеев А.Ф., Попков Г.А., Шебеко Ю.Н. и др. Влияние электрического поля на концентрационные пределы распространения пламени пропана в воздухе // Там же. — 1991. — 27, № 1. — С. 26—28.
9. 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.
10. Гуляев Г.А., Попков Г.А., Шебеко Ю.Н. О влиянии постоянного электрического поля на горение смеси пропан-бутан с воздухом // ФГВ. — 1985. — 21, № 4. — С. 23—25.
11. Calcote H.F., Pease R.N. Behavior of Hydrocarbon Flames in Electrical Field // Industrial and Engineering Chemistry. Industria Edition. — 1951. — 43, N 12. — P. 2726—2731.
12. 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—59.
13. Гуляев Г.А., Попков Г.А., Шебеко Ю.Н. и др. Исследование совместного действия инертного разбавителя и электрического поля на газофазные пламена // Там же. — 1988. — 24, № 6. — С. 66—68.
14. Саламандра Г.Д. Распространение пламени в поперечном электрическом поле // Теплофизические свойства и газодинамика высокотемпературных сред. — М.: Наука, 1972. — С. 135—143.
15. Саламандра Г.Д., Майоров Н.И. К устойчивости ламинарного пламени, распространяющегося в трубе // ФГВ. — 1982. — 18, № 4. — С. 61—64.

16. Саламандра Г.Д., Майоров Н.И. Неустойчивость фронта пламени в электрическом поле // Там же. — 1978. — 14, № 3. — С. 90—96.
17. Майоров Н.И. О механизме воздействия допробойного постоянного электрического поля на распространение пламени в трубах с неизолированными электродами // Там же. — 1985. — 21, № 5. — С. 48—53.
18. Tewari G.P., Wilson I.R. An Experimental Study of the Effects of High Frequency Electric Fields on Laser Induced Flame Propagation // Combust. Flame. — 1985. — 24, N 2. — P. 159—167.
19. Асакава Т. Воздействие электрического поля на процессы горения жидкого топлива // Вопросы горения. — М.: Металлургия, 1963. — С. 419—426.
20. Черепнин С.Н., Дашевский В.Н. Влияние внешнего электрического поля на параметры горения и электризацию сопла энергетической установки // ФГВ. — 1990. — 26, № 6. — С. 74—78.
21. Пурмал М.Я. Горение пропана в электрическом поле // Электронная обработка материалов. — 1981. — № 2. — С. 53—54.
22. Ксенофонтов С.И., Денисов Ф.Т. Распределение заряженных частиц по высоте факела углеводородного пламени, содержащего металл // Электрофизика горения: Тезисы докладов. — Караганда: ХМИ АН КазССР, 1987. — С. 32.
23. Флорко А.В., Казницкий С.В., Золотко А.Н. и др. О механизме переноса конденсированных продуктов сгорания на поверхность горячей частицы магния // ФГВ. — 1983. — 19, № 6. — С. 24—29.

107005, г. Москва,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию
27/VII 1993

УДК 621.43.057

А.А. Бузуков

ПРОМОТИРУЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ АЛКИЛНИТРАТОВ НА САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ КЕРОСИНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

На основании результатов экспериментального исследования зависимости периода задержки воспламенения керосиновоздушной смеси с присадкой алкилнитратов от исходной температуры среды делается вывод о том, что промотирующее действие присадки заключается в постепенном предпламенном саморазогреве отдельных очагов в струе смеси еще в процессе ее развития и лимитируется степенью подготовленности топлива к реагированию, затрудняемой условиями импульсного смесеобразования.

Известно, что многие нитраты органических соединений при подмешивании в жидкие углеводородные топлива даже в количестве 0,5—2 % заметно улучшают их воспламеняемость, что может быть использовано в некоторых химических технологиях или для повышения пусковых и эксплуатационных характеристик двигателей внутреннего сгорания [1—3]. Активное влияние алкилнитратов в основном связывается с созданием более благоприятных условий для самовоспламенения топливовоздушной смеси за счет образования в ней дополнительных активных центров и локального повышения температуры при развитии экзотермических реакций. И если качественная и в определенной степени количественная картина хода молекулярно-кинетических превращений и тепловых процессов для простейших газозвудушных смесей исследована детально [4—6], то для более сложных углеводородов, особенно содержащих конденсированную фазу, единой точки зрения на роль лимитирующих факторов на воспламенение не выработано до настоящего времени. Вопрос осложняется тем, что воспламенению предшествует процесс образования топливовоздушной смеси, влияющей на зарождение и ход химической реакции. Поэтому в большинстве исследований, описывающих влияние промоторов на процессы воспламенения и горения жидких топлив, фиксируются лишь некоторые интегральные результаты.

Основная характеристика воспламеняемости топливовоздушной смеси — период задержки воспламенения (ПЗВ). Этот параметр имеет строгий физический смысл для простых реакций, когда кинетические зависимости полностью определяются законом Аррениуса, и для определения ПЗВ ис-

© А.А. Бузуков, 1994.