

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА О ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Кавера А.Л., аспирант

(ДонНТУ)

*Проанализированы теоретические и практические исследования относительно вопроса о воздействии электрического поля на пламя*

Горение – одно из самых сложных, известных человеку явлений. Принято считать, что горение – процесс взаимодействия топлива с окислителем с выделением тепловой и световой энергии. Это цепная реакция последовательного дробления частиц топлива на более мелкие радикалы. До настоящего времени нет четко сформулированной теории горения. Существуют отдельные модели, которые в условиях дефицита достоверных экспериментальных данных о процессах в зонах горения, неизбежно связаны с умозрительными предположениями и зачастую содержат серьезные недостатки и даже противоречия. Согласованность теории с экспериментом служит лишь доводом в пользу работоспособности данной модели, но никак не доказывает истинности ее исходных предположений, поскольку остаются возможности альтернативных объяснений тех же самых закономерностей [1]. Попытки управлять процессами горения предпринимались давно. Одним из способов управления процессами горения, является использование электрического поля.

Согласно [2], еще в 1814 году Бранд заметил, что если поместить пламя свечи между двумя разноименно заряженными поверхностями, то отрицательно заряженная поверхность становится более нагретой и «...дым и пламя свечи явно притягиваются к ней». Использовать наложение электрических полей на пламя можно двояко. С одной стороны, электрическое поле можно использовать для увеличения интенсивности горения, а с другой – для его уменьшения, вплоть до затухания. Хотя обе стороны этого влияния равно интересны с научной точки зрения, все же больше исследований было проведено в области интенсификации горения электрическим полем, поскольку область применения этого явления довольно широка, например, создание экономичного, экологически чистого двигателя внутреннего сгорания, в теплоэнергетических установках (котельных, доменных печах) и т.д. Учитывая то, что при современном уровне развития средств пожаротушения, не существует универсального способа тушения пожаров абсолютно всех классов, представляет интерес воздействие электрического поля на пламя с целью его гашения.

Малиновский [3] в 1924 году, накладывая электрическое поле между коаксиальными цилиндрическими электродами, добивался гашения пламени, распространяющегося в богатых смесях бензина с воздухом. Продолжив эти исследования с Лавровым, Малиновский пришел к выводу, что пламена погасали только тогда, когда наблюдалось осаждение углерода.

Исследованиями передачи пламени через узкие каналы в отсутствие электрического поля и при его наложении, занимался Майоров [4]. Он пришел к

выводу, что наложение на зону горения электрического поля интенсифицирует процесс горения в каналах, высота которых достаточно велика, и уменьшает его вплоть до полного подавления в каналах меньшего размера. Запас надежности действия огнепреградителей, основанных на явлении деформации пламени в электрическом поле, может регулироваться за счет вариации разности потенциалов выше порогового ее значения без уменьшения размеров пламягасящих каналов. Кроме того, электрическое поле оказывает большее влияние на сгорание сухих смесей, чем влажных.

Влияние электрического поля на пламя связано с наличием в последнем положительно и отрицательно заряженных частиц. Это могут быть электроны, ионы и диполи. В результате возможны два механизма влияния внешнего электрического поля на пламя [5], конкурирующих между собой. Один из них связан со сдвигом во внешнем поле скоростей реакций образования и расходования радикалов  $\text{HO}_2$  и  $\text{RO}_2$  представляющих собой дипольные частицы (величина сдвига будет зависеть от напряженности внешнего поля и температуры газа). Другой механизм может проявляться в изменении поступательной энергии заряженных частиц (ионов и электронов), а значит – в изменении скорости ион-молекулярных реакций с участием активных центров.

Для достижения эффекта гашения проводился ряд опытов по совместному действию электрического поля и инертного разбавителя на газофазные пламена [6], [7]. Исследования проводились на круглой металлической горелке с внутренним диаметром 10 мм, окруженной коаксиальной с ней металлической сеткой диаметром 150 мм размером ячейки  $1 \times 1$  мм. В качестве инертного разбавителя использовали аргон и азот. Горелку заземляли, а на сетку подавали отрицательный потенциал, поскольку лишь в этом случае при указанной выше геометрии удавалось достичь гашения пламени. Было выявлено, что наложение электрического поля на диффузионное пламя только усиливает огнетушащее действие инертного разбавителя.

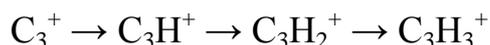
В работе [8] изучалось влияние электрического поля на параметры горения в модельной установке, имитирующую реальную камеру сгорания энергетического агрегата. Максимальный эффект воздействия электрического поля на горение в камере достигался в случае, когда электрод находился в области подготовки вблизи фронта пламени. Вывод о более полном сжигании топлива косвенно подтверждался поведением факела догорания на сопле камеры при положении электрического поля, когда при росте напряженности поля в межэлектродном промежутке факел укорачивался и полностью исчезал – процесс горения заканчивался в камере. При дальнейшем повышении напряжения до близкого к пробойному в ряде случаев факел срывался, причем попытки вновь поджечь топливовоздушную смесь при сохранении поля в камере оказывались безуспешными – происходила вспышка и пламя вновь гасло. Отмеченный выше эффект увеличения скорости горения в электрическом поле относится к случаю, когда электрод находился в области подготовки и имел положительную полярность. Исследования спектра факела показали, что яркость линий радикала  $\text{C}_2^*$  с повышением напряжения уменьшается, что свидетельствует о более полном сгорании смеси в камере. Изменение

направления поля приводило к исчезновению эффекта. Ток в этом случае с ростом напряженности быстро повышался, и пробой наступал при  $U \approx 4-4,5$  кВ.

По мнению авторов работы [8], рост скорости горения, при наложении поля на область подготовки, имеет не газодинамическую природу («ионный ветер», о котором речь будет ниже), а связан с прямым воздействием поля на кинетику химических реакций. Так, при положительно заряженном центральном электроде, электроны, генерируемые фронтом пламени, под действием поля начинают двигаться против потока газа по направлению к началу области подготовки, где вызывают инициирование свежей смеси и более полное ее сгорание при прохождении через фронт. Определенную роль в активации горючей смеси перед сгоранием играет, вероятно, также поляризация молекул топлива в электрическом поле, что повышает их химическую активность.

Практические результаты, которые могут быть получены при воздействии электрического поля на процессы горения, предельно ограничены из-за начала электрического пробоя в газе. К преждевременному пробую приводят неровности на поверхностях электродов, образующиеся, например, в результате скопления сажи или золы, т.к. они вызывают сгущение силовых линий у выпуклостей. Причиной пробоя также могут явиться: подсос горячих газов с более низкой пробивной напряженностью в приэлектродные области; сгущение силовых линий на элементах электрода, если он сетчатый. Пробой вблизи электродов служит пределом, так как он создает источник ионов, не связанный с процессами горения. Встречный поток этих ионов нейтрализует ионы, поступающие из пламени, и компенсирует эффекты, связанные с «ионным ветром». Чтобы предотвратить преждевременный пробой, следует изменить геометрию системы так, чтобы силовые линии расходились в направлении к отрицательному электроду, приложить магнитное поле или работать при более высоких давлениях. Способ, состоящий в приложении магнитного поля перпендикулярно электрическому, рассматривался Лаутоном [2]. Однако он эффективен лишь при давлениях ниже атмосферного и поэтому представляет чисто теоретический интерес.

Следует также отметить, что в конечных молекулярных реакциях образуются десятки, а иногда сотни различных ионов. Процессами ионизации в пламени занимался Фиалков [9], [10], [11]. В результате экспериментов было установлено, что первичными ионами, образующимися во фронте пламени, являются ион  $\text{СНО}^+$  и  $\text{СНО}_2^+$ , который образуется с близкой к  $\text{СНО}^+$  скоростью. Также было определено, что появлению  $\text{С}_3\text{Н}_3^+$ , который до этого считался первичным ионом предшествуют ионы



Авторы работ [12], [13], [14] изучали влияние электрического поля на скорость испарения органических горючих жидкостей, распространение пламени по поверхности твердого материала и срыв пламени с пропановодородной смеси.

В первой работе опыты проводили на установке, представляющей собой металлическую заземленную кювету диаметром 20 и высотой 10 мм, а электрическое поле создавали наложением потенциала на металлический проволочный электрод в виде кольца диаметром 80 и толщиной 2 мм, расположенный на высоте 100 мм над верхним краем кюветы. Было установлено,

что наложение как положительного, так и отрицательного потенциала приводит к возрастанию скорости испарения. При этом отрицательный потенциал оказывает большее влияние, чем положительный. Эффект увеличения скорости выгорания жидкости объясняется следующим образом. При наложении поля возникает «ионный ветер», т.е. направленное движение газа, вызываемое увлечением движущимися ионами электрически нейтральных молекул. Направление «ионного ветра» совпадает с направлением движения более тяжелых ионов. При подаче на электрод положительного потенциала «ионный ветер» должен деформировать пламя, приближая его к поверхности жидкости. За счет этого возрастает тепловой поток на поверхности жидкости и увеличивается скорость ее выгорания.

В случае же распространения пламени по поверхности твердого топлива (резинового кабеля) было установлено, что с увеличением напряжения до 10-15 кВ скорость пламени растет, а затем уменьшается. По мнению авторов, это обусловлено тем, что при относительно малых (до 10-15 кВ) потенциалах «ионный ветер» интенсифицирует газообмен вблизи поверхности материала, облегчая доступ окислителя в зону горения. При более высоких потенциалах доминирует, вероятно, механизм роста теплопотерь из фронта пламени за счет увеличения его поверхности.

При наложении электрического поля на пропановодородную смесь, пламя деформировалось, приобретая цветкообразную форму. Факт позволяет предположить наличие влияния поля на пламя в исследуемой геометрической конфигурации по механизму «ионного ветра», хотя полностью не отбрасывается и возможность воздействия поля на кинетику химических реакций [9], [10].

Как видим, авторы некоторых выше перечисленных работ, склоняются к мысли, что гашение пламени достигается благодаря эффекту «ионного ветра». Что же представляет собой «ионный ветер» и как он воздействует на пламя? Точные ответы на эти вопросы до сих пор не получены, одна из причин этого состоит в том, что ионный ветер является неизбежным следствием ионного потока при наложении поля на пламя, и результаты некоторых наблюдений более заманчиво объяснить особыми химическими воздействиями определенных ионных компонентов, чем считать их обусловленными общим газовым потоком. Еще в 1932 году, Гуно и Уилер, пользуясь методикой Малиновского, пришли к выводу, что погашение или замедление пламени можно объяснить аэродинамическим воздействием потока ионов в пламени. Одним из эффектов «ионного ветра», является уменьшение температуры пламени за счет увлечения частиц потоком. Если же электроды непроницаемы (сплошные пластины), электрическое поле приводит к рециркуляции увлекаемого газа. Что касается механизма воздействия электрического поля на нейтральные молекулы, упомянутого выше в работе [5], Лаутон в [2] предлагает следующий механизм.

В тех областях, где напряженность поля переменна, сила действует также на поляризующиеся молекулы или частицы, даже если они в общем нейтральны. Рассмотрим случай, когда поле напряженности  $E$  индуцирует в частице противоположные заряды величины  $q$ , расположенные друг от друга на расстоянии  $d_x$ . Результирующая сила, действующая на такую частицу, равна

$$F = q \left( E + \frac{\partial E}{\partial x} dx \right) - qE = \frac{\partial E}{\partial x} q dx \quad (1)$$

Член  $q dx$  представляет собой дипольный момент. Если частицей является молекула, то она может иметь постоянный дипольный момент. Это наблюдается в тех случаях, когда центр тяжести электронного облака не совпадает с центром тяжести положительного ядра молекулы, так что диполь существует даже в отсутствие поля. Так, молекулы  $CH_4$  не обладают постоянным дипольным моментом, в то время как, например, молекулы  $CO$  и  $H_2O$  в основном состоянии имеют дипольные моменты, причем эти величины зависят от состояния возбуждения молекулы. Этот постоянный дипольный момент складывается, конечно, с тем, который возникает в поле. В первом приближении можно считать, что индуцированный дипольный момент пропорционален напряженности поля:

$$q dx = \gamma E, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — поляризуемость.

Эта величина, очевидно, связана с диэлектрической проницаемостью  $D$ , так как поляризация определяет напряженность внутри диэлектрика, когда приложено поле. Например, в газе, состоящем из молекул со средней поляризуемостью  $\bar{\gamma}$ ,

$$D = 1 + 4\pi \cdot n\bar{\gamma}, \quad (3)$$

где  $n$  — число молекул в единице объема.

Следует отметить, что  $\bar{\gamma}$  имеет размерность, объема и в случае молекул имеет тот же порядок величины, что и объем молекулы.

Сила, отнесенная к единице напряженности поля, действующая на такую поляризующуюся частицу, и, следовательно, ее подвижность определяются аналогично предыдущему. Существенным различием является то, что здесь  $F$  пропорциональна  $\partial E/\partial x$ , так как на основании уравнения (1) имеем

$$F = \gamma E \frac{\partial E}{\partial x}. \quad (4)$$

Важную роль это обстоятельство может играть в тех случаях, когда геометрия системы такова, что силовые линии поля расходятся (например, вблизи заостренных электродов). Из уравнения (4) следует, что в общем случае диполи будут стремиться сконцентрироваться в точках поля с максимальной напряженностью.

Итак, перемещая ионы и диполи, электрическое поле оказывает аэродинамическое влияние, так называемый «ионный ветер». Согласно [2], его максимальную скорость у электродов можно вычислить по формуле

$$V_B = E_B / 2\sqrt{2\pi \cdot c} \quad (5)$$

и эта скорость может достигать 5,5 м/с. Для достижения более высокого результата необходимо использовать многоступенчатую систему.

Что касается поведения заряженных частиц в электрическом поле, то если подвижности ионов разных знаков сильно отличаются друг от друга и при этом напряженность поля достаточна для начала движения крупных ионов, это приведет к отводу меньших ионов с такой большой скоростью, что их концентрация станет пренебрежимо малой. И если носителями отрицательного заряда в пламени являются электроны, при значительной напряженности поля их концентрация становится пренебрежимо малой. Если концентрация электронов пренебрежимо

мала, то так же мала скорость их рекомбинации с положительными ионами. Следует отметить, что в приэлектродных областях не происходит ни образования, ни рекомбинации ионов. Кроме того, если приэлектродные области находятся при комнатной температуре, то электрон уже не является носителем отрицательного заряда.

В работе [15] были предприняты попытки рассчитать скорость «ионного ветра» для разработки установки для тушения конвейерной ленты, принцип работы которой должен был основываться на следующем. Процесс горения поддерживается за счет тепла, выделяющегося в пламени, в котором смешиваются пары летучего горючего, выделяющегося из конвейерной ленты, и окислителя, доставляемого из окружающей среды. При достаточно больших скоростях воздушного потока над поверхностью ленты, режим горения не может существовать. Скорость реакции оказывается недостаточной для того, чтобы выделяющегося тепла хватило на разогрев поступающих в пламя чересчур больших паров горючего и окислителя, что ведет к переохлаждению диффузионного пламени и его срыву. Была построена теоретическая зависимость длины поверхности конвейерной ленты, на которой произойдет срыв пламени, от скорости потока на внешней границе турбулентного пограничного слоя. Однако дальнейшего развития эта работа не получила.

В 2000 году американская компания “Spectrex” [16] разработала и запатентовала технологию подавления пожара электрическим полем. В лаборатории этой компании была сооружена установка для исследования влияния постоянного электрического поля на тушение горящего топлива. Установка состоит из двух электродов, один из которых представляет собой металлическую ванну, размер верхней части которой 30X10 см. Второй электрод представляет собой тонкую, натянутую параллельно поверхности ванны, стальную проволоку диаметром 0.2 мм. Форма второго электрода, после проведенной серии экспериментов, оказалась наиболее оптимальной. Ванна была наполнена изопропиловым спиртом.

Исходы этих экспериментов были следующими.

Скорость «ионного ветра» выше топливной поверхности была измерена специальным прибором. Отрицательная полярность (отрицательный тонкий электрод) приводит к более высокому току и, следовательно – к более сильному «ионному ветру». Однако, в то время как средняя скорость выше, максимальная скорость по оси оказывается, приблизительно на 20 % ниже. Эти характеристики были независимы от диаметра проволоки в диапазоне от 0.05 до 0.5 мм, а также от материала провода (сталь и медь).

Профиль скорости характеризуется высоким градиентом скорости около топливной поверхности. Скорость достигает максимума в диапазоне от 1 до 2 мм выше поверхности топлива и затем умеренно уменьшается. Более высокий электрический ток приводит к более высокой максимальной скорости и более тонкому потоку ионов. Для того же самого электрического тока, увеличение в угле наклона электрода приводит к более толстому потоку ионов при понижении максимальной скорости. Изучался результат влияния различных параметров на форму пламени. Среди этих параметров – высота нити над поверхностью топлива, электрический ток и электродная полярность. Систематическое изучение показало,

что регресс пламени зависит только от амплитуды профиля скорости. Можно заключить, что электрические короны позитива превосходят отрицательные.

Чтобы понять, что результат действия электрического поля является аэродинамическим явлением, профиль скорости распространения в пространстве «ионного ветра», моделировался тщательно разработанным соплом, которое было установлено на соответствующем вентиляторе. Это имело фундаментальный интерес, чтобы сравнить эффективность (КПД) прекращения горения вентилятором и «ионным ветром». Эксперименты ясно показывают, что для подобного профиля скорости, расход электроэнергии вентилятора является в 5-8 раз ниже, чем электрического поля.

Как видно из проанализированного материала, много вопросов остается до конца не изученными и для дальнейших исследований должны быть поставлены следующие задачи: сформировать четкую модель процесса горения, учитывающую влияние горючего материала и внешних условий; исследовать влияние «ионного ветра» на процесс горения; определить основные характеристики «ионного ветра» (зависимость его от формы электродов, от материала, из которого они изготовлены и т.д.); измерить фактическую скорость «ионного ветра» и найти способы ее увеличения для выяснения возможности применения этого эффекта при тушении различных возгораний.

#### Библиографический список

- 1 Гусаченко Л.К., Зарко В.Е. Анализ современных моделей стационарного горения смесевых твердых топлив // ФГВ. –1986, №6.
- 2 Лаутон Д., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. – М.: Энергия, 1976.
- 3 Малиновский А.Э. Роль заряженных частиц в процессах горения и взрыва // Социалистическая реконструкция и наука. –1934. -№7.
- 4 Майоров Н.И. Передача пламени через узкие каналы в отсутствие электрического поля и при его наложении // ФГВ. –1986, №6.
- 5 Ботова В.И., Фиалков Б.С. Влияние внешнего электрического поля на область подготовки углеводородного пламени // ФГВ. –1987, №6.
- 6 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, №2.
- 7 Гуляев Г.А., Попков Г.А., Шебеко Ю.Н., Короленок А.П. Исследование совместного действия инертного разбавителя и электрического поля на газофазные пламена // ФГВ. –1988, №6.
- 8 Черепнин С.Н., Дашевский В.Н. Влияние внешнего электрического поля на параметры горения и электризацию сопла энергетической установки // ФГВ. –1990, №6.
- 9 Фиалков А.Б., Фиалков Б.С. Экспериментальное определение первичных и промежуточных ионов во фронте пламени // ФГВ. –1988, №5.
- 10 Зиновьев Л.А., Фиалков Б.С. Изучение ионизации в пламени окиси углерода // ФГВ. – 1990, №5.
- 11 Ларионова И.А., Фиалков Б.С., Калинин К.Я., Фиалков А.Б., Остапов Б.С. Ионная структура и последовательность ионообразования в пламени ацетилена // ФГВ. –1993, №3.
- 12 Пантелеев А.Ф., Попков Г.А., Цариченко С.Г., Шебеко Ю.Н. Влияние электрического поля на распространение пламени по поверхности твердого материала // ФГВ. –1992, №3.
- 13 Пантелеев А.Ф., Попков Г.А., Шебеко Ю.Н. Влияние электрического поля на испарение и горение горючих жидкостей // ФГВ. –1992, №3.

14 Пантелеев А.Ф., Попков Г.А., Шебеко Ю.Н., Цариченко С.Г. Влияние электрического поля на предельный расход срыва диффузионного пламени пропановодородной смеси // ФГВ. – 1993, №1.

15 Булгаков Ю.Ф., Дикенштейн И.Ф., Зуйкова С.Н. Отчет о научно-исследовательской работе. – Донецк: НИИГД, 1997.

16 Fire extinguishment of pool flames by means of a DC electric field. E.Sher, E.Jacobson, R.Baron, A.Pokravalo and G.Pinhasi. Spectrex Inc. New Jersey, USA, 2003.

© Кавера А.Л., 2004