

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. М. Степанов, Б. Г. Дьячков. Ионизация в пламени и электрическое поле. М., «Металлургиздат», 1968.
2. H. C. Jaggerts, A. von Engel. Combustion and Flame, 1971, 16, 3, 275.
3. R. J. Bowser, F. J. Weinberg. Combustion and Flame, 1972, 18, 2, 296.
4. Г. Д. Саламандра. ФГВ, 1969, 5, 2, 189.
5. Н. А. Исаев, Ю. А. Максимов, С. А. Аbruков. В сб. «Физика вибрационного горения и методы ее исследования». Чебоксары, изд. ЧГУ, 1971.
6. T. M. Sugden, 10-th Symp. on Combustion. Cambridge, 1964, 539.
7. N. R. Mukherjee, T. Fueno а. о. 8-th Symp. on Combustion. Baltimore, 1962, 1.
8. Е. С. Семенов, А. С. Соколик. ФГВ, 1970, 6, 1, 37.
9. Э. Н. Таран. ФГВ, 1971, 7, 1, 99.
10. А. Г. Гейдон, Х. Г. Вольфхард. Пламя, его структура, излучение и температура. М., «Металлургиздат», 1959.
11. И. Мак-Даниэль. Процессы столкновения в ионизованных газах. М., «Мир», 1967.
12. С. Чепмен, Т. Каулинг. Математическая теория неоднородных газов. М., ИЛ, 1960.
13. М. Ван-Дайк. Методы возмущений в механике жидкости. М., «Мир», 1967.

УДК 536.46

О ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ИОНИЗАЦИИ В ПЛАМЕНИ

В. П. Богословский, В. В. Зайчиков, И. Б. Самойлов

(Москва)

Механизм хемионизации в углеводородных пламенах в настоящее время в общих чертах установлен [1]. Подробно изучена также связь между хемионизацией и другими параметрами в пламени [2—4]. Все это позволяет использовать метод ионизационного зонда для изучения структуры пламени, что особенно важно в случае турбулентного горения. Однако общепризнанных результатов в этой области с помощью зондовой методики получено не было [5]. Одной из причин, обусловивших отсутствие надежных результатов, является наличие лишь качественных представлений о работе зонда в пламени. Нет, в частности, теории, которая позволила бы количественно сопоставить ионизационные измерения в ламинарном и турбулентном пламенах, хотя расчеты и эксперимент показывают [6, 7], что величина тока на зонд существенно зависит от числа Re в плазме.

В данной работе экспериментально рассматриваются особенности зондовой методики, которые могут оказать влияние на величину тока при измерениях в турбулентном пламени. Изучаются переходные процессы в системе зонд — пламя, влияние температуры зонда, турбулентности в пламени, а также конструктивных элементов зондовой методики на измерения.

Динамические свойства системы зонд — пламя — опорный электрод. Изучению переходных процессов в газоразрядной плазме посвящено довольно много работ (см. обзор [8]). При постановке аналогичной работы с пламенем авторы стремились выяснить, наблюдаются ли при измерениях в нем эффекты, связанные с быстрым изменением свойств пламени (или потенциала зонда), что характерно, например, для турбулентного пламени.

Измерения проводились в пламени бунзеновской горелки. Ионизационные зонды представляли собой стержни из проволоки диаметром от 0,5 до 1 мм, которые вводились в пламя (рис. 1). При измерениях на

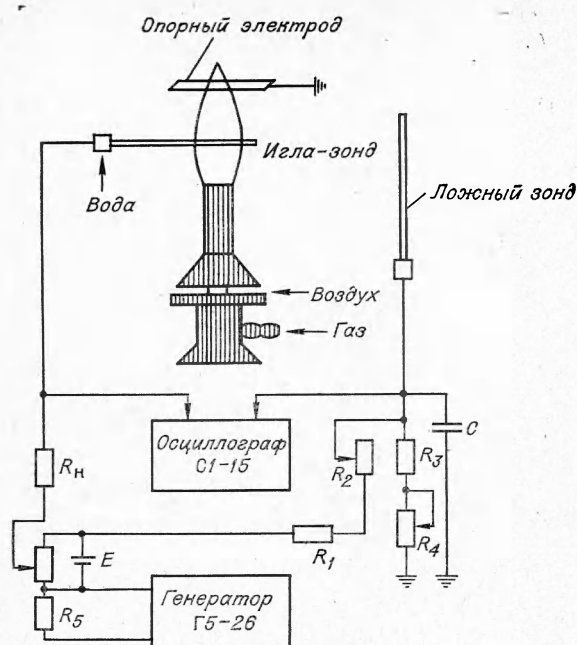


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. $R_1 = 22 \text{ кОм}$, $R_2 = 1,8 \text{ кОм}$, $R_3 = 75 \text{ кОм}$, $C = 62 \text{ пФ}$, $R_н = 30 \text{ кОм}$.

зонд подавалось напряжение в виде прямоугольных импульсов от генератора Г5-26. Схема регистрации состояла из осциллографа с дифференциальным предусилителем, на один вход которого подавался сигнал, а на второй был подключен ложный зонд. Пламя заземлялось при помощи пластин из нержавеющей стали.

В первой серии опытов на зонд подавались положительные и отрицательные прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой 1,5 и 10 В. Переходные процессы, возникающие при нарастании импульса напряжения, должны быть близкими к тем, которые возникают при быстром набегании фронта пламени на зонд. Соответствующие сигналы тока представлены на рис. 2. Резкое нарастание напряже-

ния на зонде приводит к появлению выбросов тока, величина которых в некоторых случаях может быть значительной. Наблюдаемые при отрицательном импульсе напряжения выбросы тока аналогичны описанным в работе [9] и связаны с импедансом приэлектродного слоя. При положительном импульсе также регистрируются выбросы тока, но они имеют место лишь при потенциалах, превышающих потенциал пламени. Амплитуда таких выбросов превосходит стационарное значение тока в несколько раз, а время релаксации достигает 50—60 мкс.

Во второй и третьей сериях опытов изучалось влияние величины постоянного смещения потенциала на зонде, относительно которого подавались импульсы напряжения, а также частоты их следования на обнаруженные выше выбросы тока. Было установлено, что отрицательное смещение не оказывает заметного влияния на форму импульсов тока. При положительном смещении в результате переходных процессов при спаде импульса напряжения на зонд может некоторое время течь ионный ток, несмотря на наличие положительного потенциала (рис. 3). Это означает, что потенциал пламени не остается постоянным при изменении потенциала на зонде. Было обнаружено также, что величина выброса

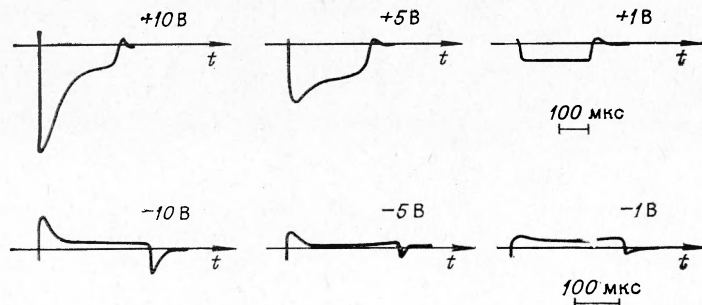


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока при подаче на зонд прямоугольных импульсов напряжения.

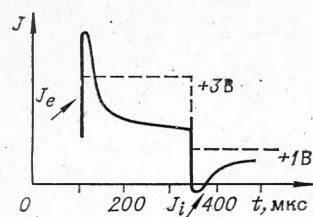


Рис. 3. Осциллограмма тока при подаче импульса напряжения. J_e — ток электронов, J_i — ток ионов.

тока зависит от частоты следования импульсов напряжения и что он полностью исчезает при интервале между импульсами менее 10 мкс.

Для выяснения причин появления выбросов тока были проведены эксперименты, в которых менялись свойства электрода и зонда. Оказалось, что размеры, материал и температура зонда, а также площадь заземляющей пластины слабо влияют на величину выброса, в то время как повышение температуры опорного электрода от 700 до 1000—1100°С приводит к его исчезновению за счет роста стационарного значения тока. Это позволило предположить, что сравнительно холодный пограничный слой у опорного электрода независимо от его площади препятствует эффективному заземлению пламени, в результате чего оно заряжается до некоторого промежуточного потенциала, а у опорного электрода образуется так называемый двойной слой, емкость которого и обуславливает выбросы тока. Это было подтверждено прямыми измерениями. При помощи дополнительного зонда было обнаружено, что ламинарное пламя, заземленное металлическими пластинами с полезной площадью 25—30 см², оказалось заряженным под действием потенциала на зонде в непосредственной близости от пластин.

Показательны в этом смысле также опыты, в которых часть ламинарного пламени, находящаяся вблизи опорного электрода, турбулизовалась при помощи струи воздуха или пламени от другой горелки так, чтобы не исказить участок пламени, расположенный вблизи зонда. В этом случае описанный выше выброс тока не регистрировался, но зато наблюдалось возрастание величины стационарного тока на зонд.

Эти опыты показывают, что даже большие, но сравнительно холодные электроды в ламинарном пламени не могут обеспечить достаточный отвод ионов при положительном потенциале на зонде, что лимитирует величину тока или искажает форму сигнала, если процесс нестационарный. На рис. 4 показан профиль ионизации во фронте ламинарного пламени, полученный при быстром (1—2 м/с) пересечении шаровым зондом зоны горения. При контакте зонда с крутым фронтом горения с внутренней стороны конуса пламени регистрируется выброс тока (показано стрелкой), величина которого тем больше, чем быстрее зонд пересекает пламя и чем холоднее заземляющая поверхность. Величина тока и выброса зависит от расстояния между электродами.

Что касается динамических свойств призондового слоя, то заметных эффектов, с ним связанных, обнаружить не удалось.

Влияние температуры зонда на ионизационные измерения. При использовании зондовой методики влияние температуры зонда на количественные измерения в ламинарном пламени во многих случаях представляют некоторую проблему, даже если размеры зонда малы и он нагрет окружающим газом [4, 10]. Очевидно, что это влияние будет существенным, когда область температурного возмущения превосходит или близка к толщине электрического слоя вокруг зонда. Следовательно, при измерениях в турбулентном пламени температура зонда должна оказывать меньшее влияние.

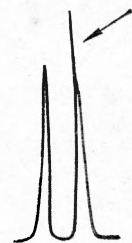


Рис. 4. Осциллограмма профиля ионизации во фронте пламени.

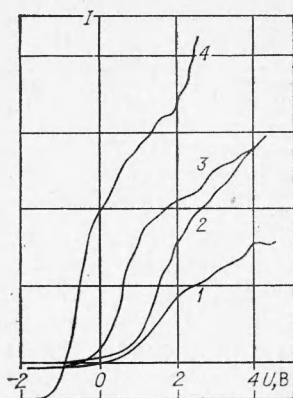


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики ионизационных зондов в ламинарном пламени.

Методика этой части работы принципиально не отличалась от описанной выше. В качестве зонда была использована игла от шприца диаметром 0,6 мм, сквозь которую пропускалась вода для охлаждения. Для получения вольт-амперных характеристик на зонд подавалось пилообразное напряжение от генератора. При снятии спектра частот пульсаций ионизационного тока использовался анализатор СК4-3.

На рис. 5 показаны вольт-амперные характеристики холодных (1, 2) и горячих (3, 4) зондов. Кривая 1 соответствует зонду, предварительно отоженному в пламени, а кривая 2 получена при помощи зонда из новой иглы с никелированной поверхностью. Кривые 3 и 4 получены теми же зондами, но без подачи охлаждающей воды, когда температура зонда была равна 700°С (по пирометру, без учета излучательной способности материала зонда).

Рис. 5 позволяет сделать вывод, что состояние поверхности зонда, а также его температура во многом определяют вид вольт-амперной характеристики и, следовательно, измеряемую величину тока. Различие кривых 1 и 2 вызвано, по-видимому, каталитическим действием никелевой поверхности, которое проявляется даже в холодном состоянии. Резкий подъем кривой 4 вызван сгоранием никелевой пленки при нагревании. Кривая 3 (по сравнению с кривой 1) характеризует влияние чисто теплового возмущения на величину ионизационного тока.

Приведенные результаты опытов показывают, что наибольшую погрешность при измерении электронного тока в ламинарном пламени может вносить обгорание поверхности зонда, а при использовании малых напряжений — сдвиг вольт-амперной характеристики в результате изменения величины пристеночного потенциала в зависимости от температуры. В этом случае ошибка измерения может быть более одного порядка.

Как показывают расчеты [11], охлаждение зонда должно приводить к завышению величины измеряемой температуры электронов. Анализ вольт-амперных характеристик, приведенных на рис. 5, подтверждает этот вывод. Температура электронов, измеренная при помощи охлаждаемого зонда, оказывается в 1,5—2 раза выше значения, полученного при использовании нагретого зонда.

Рассмотрим измерения в турбулентном пламени. Влияние температуры зонда на измерения электронного тока изучалось путем сопоставления спектров пульсаций тока, полученных при помощи холодного и горячего зондов. Измерения проводились в пламенах различного состава, в исходной смеси $Re=6 \cdot 10^3$. Полученные спектрограммы (в работе не приводятся) показывают, что влияние температуры зонда сказывается только на частотах до 50 Гц, спектрограммы на больших частотах полностью совпадают. Это можно объяснить тем, что на низких частотах условия работы зонда близки к тем, которые имеют место в ламинарном пламени, где, как показано выше, влияние температуры существенно. В соответствии с этим амплитуда пульсаций тока в низкочастотной области спектра, полученного при помощи нагретого зонда, была выше соответствующих значений, полученных при помощи охлаждаемого зонда.

Измерения двойным и одиночным зондами. Определяющим фактором при использовании хемионизации для изучения и регулирования процесса сжигания топлива является наличие связи между скоростью

реакции горения и скоростью ионообразования. Существование такой связи было экспериментально показано для ламинарного пламени в работе [4]. Однако в наиболее важном случае (при турбулентном горении) методом одиночного зонда в работе [12] было обнаружено аномальное увеличение электронного тока при возрастании турбулентности. Позднее в работе [13] было показано, что возрастание тока на зонд при турбулизации плазмы может быть обусловлено переходом от диффузионного движения зарядов к конвективному их забросу в призондовый слой. Вместе с тем результаты опытов, описанных выше, подчеркивают роль процессов, происходящих у опорного электрода при измерении ионизации в пламени.

Опыты показали, что, охлаждая опорный электрод и перемещая его в пламени, можно изменить соотношение измеряемого электронного тока в ламинарном и турбулентном пламенах от 10 до 100 раз. Естественным способом преодолеть эти затруднения является переход к измерениям при помощи двойного зонда. Использование малоразмерного двойного зонда избавляет от неучитываемого влияния числа Re на измерения, так как местное значение Re у зонда остается малым даже для сравнительно больших значений скорости газа в пламени. Кроме того, двойной зонд позволяет отказаться от необходимости пользоваться сомнительным во многих случаях предположением о постоянстве потенциала плазмы по длине пламени.

Измерения ионизации проводились на бунзеновской горелке в пламени метано-воздушных стехиометрических смесей при помощи двойного и одиночного зондов. Их рабочая часть была изготовлена в виде шариков диаметром 0,1 мм, полученных оплавлением платиновой проволоки диаметром 0,015 мм. При помощи искры эта проволока с шариком на конце приваривалась к стержню диаметром 0,1 мм, на который был надет кварцевый капилляр с внешним диаметром 0,3 мм. Корпус зонда закреплялся в специальном устройстве, которое позволяло пересекать зондом зону пламени и получать, таким образом, профиль относительной плотности ионов в поперечном сечении факела. Это сечение выбиралось так, чтобы измерения проводились у вершины внутреннего конуса пламени. Число Re в зоне измерения оценивалось по его величине в сопле горелки, диаметр которого был равен 4 мм. Как показали шлирен-фотографии (здесь не приводятся), внутренний конус турбулентного пламени располагался в ядре потока свежей смеси.

На рис. 6 приведены результаты измерений максимальных амплитуд ионизационного тока в ламинарном и турбулентном пламенах, измеренные при различных потенциалах на зондах. Как видно, величины тока, полученные при помощи двойного (вследствии симметричности результаты показаны только для отрицательных потенциалов) и одиночного зондов, существенно различны. Ионизация, измеренная в турбулентном пламени при $Re = 6 \cdot 10^3$, превышает измеренную тем же способом ионизацию в ламинарном пламени более чем на порядок (кривые 1 и 2).

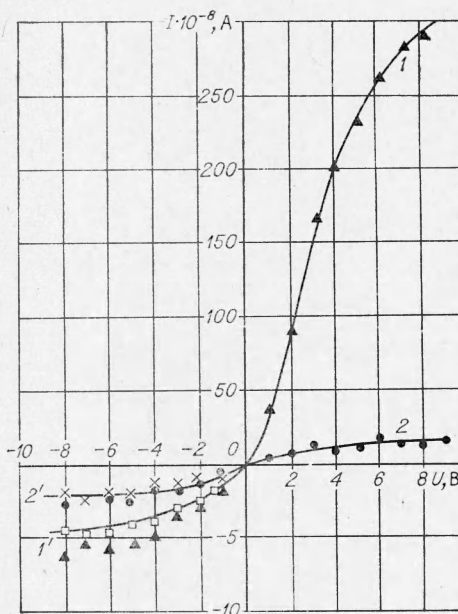


Рис. 6. Максимальные амплитуды ионизационного тока, измеренного в турбулентном и ламинарном пламенах.

Однако при измерении двойным зондом эти величины отличаются не более чем в 2—3 раза (кривые 1' и 2'). Такое же соотношение дают и измерения, выполненные при помощи одиночного зонда, но при наличии на нем отрицательного потенциала (см. рис. 6, темные точки и треугольники).

Здесь уместно отметить, что методически эти результаты аналогичны полученным в работе [13] при измерении электронной температуры. Вероятно, имеется одна общая причина, которая приводит к различным результатам измерений при помощи одиночного и двойного зондов, — при больших электронных токах на зонд трудно обеспечить эффективное заземление пламени. Это особенно существенно при измерениях в ламинарной зоне горения, поскольку толщина охлажденного пограничного слоя у опорного электрода, пропорциональная $\frac{1}{\sqrt{Re}}$, в этом случае значительно превышает ее значение в турбулентном пламени. Поэтому обнаруживаемое при помощи метода одиночного зонда многократное увеличение скорости ионообразования при турбулизации пламени углеводородов нельзя считать достаточно обоснованным.

Поступила в редакцию
3/1 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Peeters et. al. Oxidation and Combustion Reviews. Elsevier, 1969, 4, 1.
2. Е. С. Семенов, А. С. Соколик. ЖТФ, 1962, 32, 9.
3. William J. Miller. Oxidation and Combustion Reviews, Elsevier, 1968, 3, 2.
4. H. F. Calcote, I. R. King. 5-th Symposium International on Combustion. N. Y., 1955, 423.
5. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М., «Наука», 1971.
6. Е. Хомяк, Ю. Ярославский. ФГВ, 1970, 6, 3.
7. R. M. Clements, P. R. Smy. Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D), 1964, 2, 12.
8. Р. Халдстоун, С. Ленард. Диагностика плазмы. М., «Мир», 1967.
9. P. W. Carlson et. al. Physica, 1964, 30, 182.
10. D. Lyddon Thomas. Phys. Fluids, 1960, 12, 2.
11. В. И. Твердохлебов. Докт. дисс., ИХФ АН СССР, 1969.
12. А. С. Соколик, Е. С. Семенов. ЖФХ, 1964, 7.
13. Harry Silla, Thomas J. Dougherty. Combustion and Flame, 1972, 14, 1.

УДК 536.46

О СУЩЕСТВОВАНИИ МИНИМАЛЬНОГО ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ В ПОТОКЕ ГАЗОВОГО ОКИСЛИТЕЛЯ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

А. Вежба

(Варшава)

Возникновение детонационного горения двухфазных смесей за фронтом ударной волны было впервые описано в [1]. Затем в работе [2] было установлено, что скорость испарения капель топлива, необходимая для поддержания и усиления ударной волны, требует, чтобы величина поверхности топлива на порядок и больше превышала первоначальную в данных опытах. Это наблюдение привело к выводу, что за фронтом ударной волны имеет место механическое дробление капель, приводящее к сильному росту суммарной поверхности топлива. Основ-