

## ЛИТЕРАТУРА

1. G. Darricus. *Za Mechanique des fluides*. Paris., Dunad, 1941
2. Л. Д. Ландау. *ЖЭТФ*, 1944, **14**, 6.
3. W. M. Elsasser. *Phys. Rev.*, 1950, **79**, 183.
4. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред*. М., Гостехиздат, 1957.
5. «Нестационарное распространение пламени». Сб. под редакцией Д. Г. Маркштейна. М., «Мир», 1968.
6. И. М. Гельфанд. *УМН*, 1959, **14**, 87.
7. Н. Г. Чеботарев, Н. Н. Мейман. Проблема Раусса — Гурвица для полиномов и целых функций. М.—Л., ИАН, 1949.

УДК 536.46+662.613.

### О ПРИРОДЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ШУМА», ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ГОРЕНИИ

*В. С. Фиалков, В. Т. Плицын, Я. И. Магун,  
Г. П. Сенкевич  
(Караганда)*

Значительный интерес с точки зрения познания механизма процесса горения открывает явление «электрического шума» пламени, по-видимому, впервые исследованное Марсденом [1, 2]. Это явление проявляется в том, что при помещении в пламя двойного зонда без источника внешней э. д. с. на нагрузочном сопротивлении, включенном между его электродами, возникает переменное напряжение. Далее это явление было исследовано в работах [3—8], что позволило разработать различные способы его использования для целей контроля и управления процессом горения. Более того, Клейном [9—11] показана возможность при этом прямого преобразования энергии горения в электрическую. Благодаря простоте и надежности зондов, исключению ряда принципиальных недостатков других методов [8], создалась возможность исследования особенностей электронно-ионных явлений при горении не только газообразного или жидкого, но и кускового твердого топлива, причем в различных режимах его сжигания (в слое, потоке дутья и т. д.). Учитывая это обстоятельство, а также известную противоречивость взглядов на механизм возникновения «электрического шума», необходимо более подробно рассмотреть природу этого явления.

Марсден [1] и Гайгнебет [3] установили, что э. д. с., обусловленная внешними электромагнитными полями, равно как и термо-э. д. с. или тепловые шумы, не могут быть признаны ответственными за наблюдаемый эффект. Наши измерения в пламени газовой горелки, полностью экранированной от внешних полей заземленной металлической сеткой, в зонах горения огневого стенда, доменной печи и в пылеугольном факеле парового котла, где экранирование было там более надежно и полно, также говорят о чисто внутреннем происхождении напряжения, возникающего на помещаемом в пламя зонде. Последнее было предметом специального эксперимента, в связи с естественным предположением о возникновении «электрического шума» за счет внешних полей в силу известного свойства проводящего пламени, с размерами много большими размеров зонда, воспринимать и усиливать шумы.

По мнению Марсдена [1], основной причиной возникновения этого эффекта является ускорение при движении заряженного газа. Тогда

«электрический шум» не будет возникать при любом движении газа, в котором отсутствует разделение зарядов вне зависимости от степени ионизации, либо при равномерном движении, даже в случае разделения зарядов. Известно, что при нейтральности пламени в целом, отдельные его участки могут иметь заряды различного знака. Сообщение отдельным макрообъемам пламени разноименных зарядов является следствием ряда факторов, из которых важнейшими являются различие в подвижности электронов и положительных ионов, а соответственно и в скоростях их диффузии, в сочетании с неодинаковой степенью ионизации отдельных участков пламени; и турбулентное движение потока в сочетании с различной массой электронов и положительных ионов. Отдавая предпочтение последнему фактору, Марсден рассматривал «электрический шум» прежде всего как порождение турбулентности, на основании чего и предложил использовать его измерение как способ получения информации о ней [2].

Эффект, близкий к описываемому, наблюдали Клейн и С. И. Мухин при различной температуре помещенных в пламя незаземленных электродов или создавая у поверхности одного из них поток электроотрицательных газов — кислорода, хлора, брома или йода [4, 9—11]. Постоянная составляющая генерируемого напряжения достигала при этом 1,6—2,0 в. С. И. Мухин [4] объясняет наблюдающийся эффект возникновением между нагретыми до различной температуры электродами термоэлектродвижущей силы. Однако в опытах Марсдена и наших напряжение генерировалось и при одинаковой температуре электродов. Более того, эффект не исчезал и при изоляции электродов от пламени керамикой. Наконец, максимум распределения по зоне горения «электрического шума» и температуры смещены относительно друг друга (рис. 1). Для объяснения этого явления более правильно привлечь понятие стеночного потенциала.

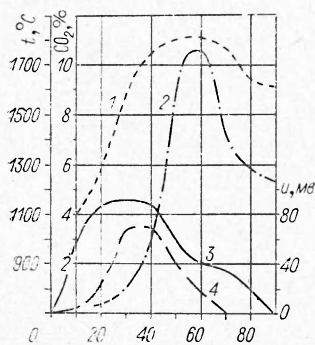


Рис. 1. Изменение постоянной 1 и переменной 2 составляющих «электрического шума», температуры газа 3 и концентрации углекислоты 4 по длине зоны горения.

Отметим, что, как показали исследования В. Е. Анисимова [12], величина стеночного<sup>1</sup> потенциала зависит от скорости реакции горения. В экспериментах с метановоздушным пламенем установлено, что наибольшее значение этого потенциала достигается при сжигании стехиометрической смеси и уменьшается при обеднении или обогащении смеси. Очевидно, что при равномерной в объеме степени ионизации газа соединение двух таких тел внешней электрической цепью не вызывает возникновения в ней электрического тока. Иное дело, когда у поверхности одного из таких тел по сравнению с другим изменяются условия и вслед за ними его стеночный потенциал примет новое значение.

В этом случае по соединяющей эти тела внешней цепи потечет электрический ток, напряжение которого определится разностью стеночных потенциалов, а мощность — различием ионизации газа и энергии электронов. Нагрев электродов до различной температуры либо введение у одного из них электроотрицательного газа и

<sup>1</sup> В [12] определялся не стеночный потенциал тела, а плавающий потенциал зонда. Однако нет оснований предполагать в их изменениях под действием внешних условий какие-либо принципиальные отличия.

есть средства регулирования величины разницы стеночных потенциалов. Превалирующее значение в этом случае имеет разная интенсивность горения у электродов с различной температурой [10]. При этом влияние интенсивности горения двояко.

У более нагретого электрода интенсивность выше, а соответственно и значительнее степень ионизации. Замедление реакции у менее нагретого электрода приводит не только к уменьшению количества заряженных частиц, но и к замедлению расходования кислорода. Последний же — в чем, собственно, и состоит его электроотрицательность — обладает способностью к захватыванию свободных электронов и образованию отрицательных ионов со значительно меньшей, чем у электронов, подвижностью. Благодаря совместному действию перечисленных факторов, создается различие в концентрации электронов у «холодного» и «горячего» электродов, а следовательно, и различие их стеночных потенциалов, обуславливающее повышение напряжения во внешней цепи.

Аналогичен описанному механизм увеличения напряжения при обдувании одного из электродов электроотрицательным газом, подводимым извне. Отличие здесь, по-видимому, лишь количественное, поскольку независимая от хода процесса горения концентрация газа позволяет достичь вблизи электрода полного захватывания электронов, а следовательно, и повысить напряжение между электродами до величины стеночного потенциала [9—11]. Очевидно, что при постоянстве прочих факторов нестабильность горения, обуславливающая изменение концентрации заряженных частиц в газе, омывающем электроды, вызовет соответственные колебания напряжения между электродами. Однако величина этих изменений будет, по-видимому, зависеть от отношения изменения количества заряженных частиц, точнее — электронов, в единице объема газа в приэлектродной области вследствие нестабильности горения к изменению их количества из-за активной роли электродов. Способствующие увеличению напряжения активизация процесса у одного из электродов, изменение его температуры, введение электроотрицательного газа и т.п. будут обуславливать одновременно и стабилизацию напряжения.

Последнее, будучи, безусловно, полезно при использовании рассматриваемого явления для прямого преобразования энергии горения в электрическую, снижает его при использовании для целей контроля стабильности процесса горения. В этом отношении бесспорным преимуществом обладает явление «электрического шума» пламени, проявляющееся при отсутствии каких-либо внешних воздействий на приэлектродную область [1]. Несомненно, величина сигнала при этом много меньше, чем достигается по методу Клейна [9], однако высокая чувствительность и безынерционность искупают этот недостаток. Более того, полученные в [6—8] значения «электрического шума» в пределах 10—100 мВ являются достаточно высокими при использовании их в целях контроля и автоматизации.

В то же время интерпретация, даваемая Марсденом явлению «электрического шума» пламени, встречает определенные возражения. Напомним, что «электрический шум» порождается неравномерным движением мимо электродов двойного зонда без источника внешней э. д. с. заряженных объемов газа и обусловлен тем, что концентрация заряженных частиц у электродов отлична друг от друга в силу разделения зарядов различной их подвижностью и действием турбулентных потоков [2]. Однако наши наблюдения не показали существенного различия сигналов при изменении расстояния между электродами в пределах одноименного участка пламени или зоны горения доменной печи.

Турбулентные же завихрения в пламени имеют конечные размеры, и соответственно вызванное нами разделение зарядов изменяется в пределах зоны градиентов скорости газа и в зависимости от величины этих градиентов. В силу этого, если расстояние между электродами больше размера турбулентной неоднородности потока, то спектр сигнала должен был бы объединяться, а его амплитуда уменьшаться, но это не соответствует наблюдениям.

Следует иметь в виду, что схема включения зонда для обнаруживания «электрического шума» предусматривает заземление одного из элементов и соединение с «землей» второго через нагрузочное сопротивление [8]. Напряжение на последнем возникает как результат различного времени стекания зарядов с электродов, а соответственно и различного потенциала. Следовательно, «электрический шум» может иметь место не только в тех случаях, когда электроды по-разному заряжаются вследствие разделения зарядов, но и при одинаковом изменении количества и знака заряженных частиц в газе. Другое дело, что при стабильной ионизации газа или при ее изменении за время, большее постоянной времени зонда, измеряемое напряжение обратится в нуль.

Тогда работу зонда при обнаружении «электрического шума» можно представить следующим образом. При помещении в газ заряженных частиц со стабильной степенью ионизации и равномерным по объему распределением приобретаемые электродами заряды равны между собой. Благодаря стационарности условий, возникающее в момент ввода зонда в ионизированную среду напряжение на сопротивлении, включенном между незаземленным и заземленным электродами, постепенно исчезает со скоростью, определяемой разницей в постоянных времени разряда обоих электродов.

Изменение степени ионизации газа вызывает переходный процесс установления новых значений концентрации заряженных частиц вблизи электродов, а следовательно, заряда и потенциала последних. В силу разной постоянной времени разряда электродов во внешней их цепи возникает электрический ток, а на нагрузочном сопротивлении — напряжение, пропорциональное величине и скорости изменения возмущения. В тех случаях, когда время последнего меньше времени выравнивания зарядов электродов, на нагрузочном сопротивлении возникает переменное напряжение, носящее импульсный характер. Ширина импульса при постоянной величине сопротивления пропорциональна длительности возмущения. Если же за время разряда зонда происходит несколько возмущений степени ионизации газа, то напряжение, возникающее на нагрузочном сопротивлении, обретает и постоянную составляющую, тем большую, чем чаще и интенсивнее возмущение.

Отметим также, что в случаях, когда благодаря тем или иным внешним воздействиям в омываемом электродами газе преобладают заряженные частицы одного знака, это должно обуславливать поляризацию импульсов переменной составляющей и знак постоянной составляющей напряжения, возникающего на нагрузочном сопротивлении.

Другой источник возникновения напряжения на нагрузочном сопротивлении — неравномерное распределение заряженных частиц в газе, омываемом приэлектродную область, например, из-за турбулентности его потока, чем вызывается неодинаковая величина и знаки заряда электродов. Механизм последнего подробно рассмотрен в работах [1, 2].

Отметим, что здесь возникновение постоянной составляющей маловероятно, поскольку распределение и направление турбулентных вихрей, способствующих разноименному заряду электродов, случайно, а следовательно, и направление тока через нагрузочное сопротивление должно иметь знакопеременный характер.

Рассматривая механизм регистрации «электрического шума», следует иметь в виду и возможность приема с помощью зонда электромагнитных волн, возникающих в результате движения групп заряженных частиц одного знака в сложном магнитном поле, в том числе и в поле, создаваемом собственными и другими заряженными частицами, перемешивающимися с потоком газа. Реальность такого предположения основывается на том, что при изоляции электродов зонда от пламени с помощью керамики наблюдалось сохранение характера «электрического шума».

Поскольку горящим объемом газа испускаются электромагнитные колебания, то они в пространстве, ограниченном эффективными значениями напряженности поля, способствуют интенсификации и синхронизации горения соседних объемов. Действительно, излучение энергии предопределяет способность и к ее поглощению в том же частотном диапазоне. Последнее же способствует «раскачке» горячей системы, состоящей из смеси окислителя и топлива в данном микрообъеме; наложению положительных, способствующих интенсификации процесса, обратных связей на соседние системы; возникновению своеобразного «авторезонанса» при горении. Не в этих ли «авторезонансных» явлениях и лежит одна из причин импульсного характера «электрического шума» и изменение проводимости, состоящая в прохождении мимо электродов зонда комплексов синхронно горящих микрообъемов газа? Очевидно, при отсутствии такого рода взаимонастройки рассматриваемые параметры должны были бы иметь иной, свойственный хаотическим процессам вид.

Таким образом, рассмотрение возможных причин возникновения «электрического шума» позволяет расширить данное Марсденом определение этого явления, полагая, что оно есть результат и мера неустойчивости концентрации и распределения заряженных частиц в газе, омывающем электроды зонда. Неустойчивость же может порождаться как в результате турбулизации потока, так и неустойчивости горения.

Изложенные выше соображения о природе «электрического шума» позволяют объяснить возникновение предположения о преимущественной ответственности за его параметры турбулентности тем, что соответствующие исследования [1, 2] проводились Марсденом на пламенах газообразного топлива. В этом случае турбулизация потока способствует интенсификации горения с сопровождающим ее увеличением степени ионизации газа. Тем самым, возможные причины возникновения «электрического шума» при сжигании газообразного топлива выступают во взаимосвязи, причем интенсивность горения и концентрация заряженных частиц и здесь имеют преобладающее значение.

Экспериментальное изучение природы «электрического шума» было проведено при различных способах сжигания твердого топлива и на газовом факеле. Эксперименты при сжигании твердого топлива хотя и более трудны, чем при сжигании газа, но позволяют более четко разделить последствия влияния турбулентности газового потока и интенсивности горения на электронно-ионные явления.

При рассмотрении результатов экспериментов прежде всего отметим, что в отличие от [1] постоянная составляющая достигала величины в 50—100 мВ. Характерно, что последнее имело место в тех участках зоны горения (см. рис. 1), где переменная составляющая была наиболее развита, а интенсивность горения и ее неустойчивость достигали наибольшей величины. Аналогичные результаты получены и при исследовании пылеугольного факела в топке парового котла. Вообще следует отметить четко прослеживающуюся связь между параметрами «электрического шума», проводимости газов, а соответственно их ионизации и интенсивностью горения. Переменная составляющая «электрического

шума» имеет несомненно импульсный характер (рис. 2). Во многих случаях наблюдалась преимущественная поляризация импульсов, изменяющаяся либо по длине зоны горения (или по высоте пламени), либо в течение времени.

В ходе экспериментов было установлено, что между осциллограммами «электрического шума» и переменной составляющей электропроводности, снятыми в различных точках зоны циркуляции или турбулентного пропан-бутанового факела, имеет место практически полная аналогия. Это весьма важно в связи с тем, что применявшаяся методика определения проводимости газов predeterminedляла чувствительность прежде всего к изменению концентрации заряженных частиц, а не к величине их разделения, которое могло происходить благодаря турбулентности газового потока. Собственно, это соответствие характера переменной составляющей проводимости и «электрического шума» и послужило первоначальным основанием для предположения о том, что последний есть не столько результат разделения заряженных частиц или их ускоренного движения под воздействием турбулентности газового потока, сколько последствие изменений степени ионизации газа под воздействием неустойчивости процесса горения.

Для проверки этого положения и в связи с изучением воздействия на процесс горения дискретного поступления кокса в зону циркуляции в рамках настоящей работы было проведено исследование влияния на характер «электрического шума» степени ионизации газа, интенсивности горения, турбулизации потока и т. д. Идея эксперимента состояла в том, что поскольку основной причиной возникновения «электрического шума» является турбулентность газа, то при увеличении степени ионизации газа за счет несвязанных с горением причин амплитуда сигнала должна возрасти, а его спектр обогатиться благодаря увеличению уровня составляющих, ранее не регистрировавшихся из-за малой амплитуды. В конечном итоге это должно было бы привести, в частности, к появлению на осциллограммах «электрического шума» дополнительного числа импульсов. В том же случае, если за возникновение «электрического шума» в основном ответственна не турбулентность газов, а неста-

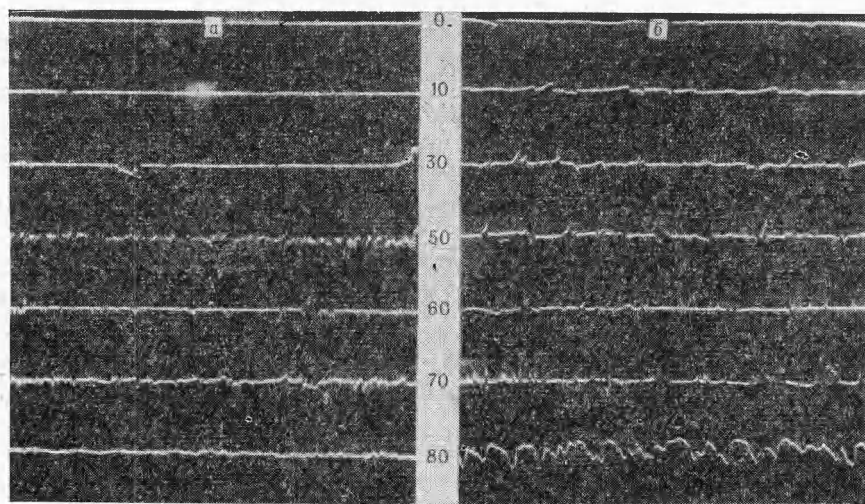


Рис. 2. Изменение «электрического шума» по длине зоны горения при естественной (а) и повышенной (б) ионизации. (Цифры у осциллограмм — расстояния от глаза фурмы, мм. Отметчик времени 50 гц.)

бильность самого процесса горения, то введение дополнительного и независимого от горения количества заряженных частиц должно было бы привести к противоположному результату — обеднению спектра «электрического шума», уменьшению количества импульсов на осциллограмме и т. д. Последнее связано с тем, что определенная часть первоначальных возмущений степени ионизации соизмерима с уровнем, порожденным термической ионизацией введенных извне легкоионизируемых элементов, или в той или иной степени не достигает его, а следовательно, и теряется на его фоне.

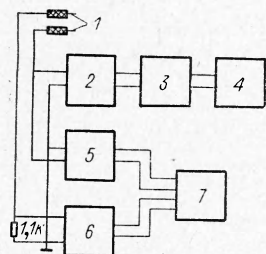


Рис. 3. Принципиальная схема измерений при снятии динамических вольт-амперных характеристик. 1 — двухэлектродный датчик; 2 — согласующий трансформатор; 3 — усилитель мощности; 4 — генератор; 5, 6 — электроннолучевые осциллографы; 7 — шлейфовый осциллограф.

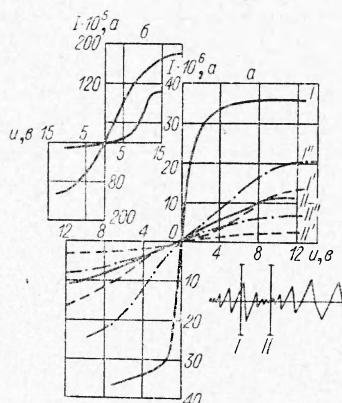


Рис. 4. Динамические вольт-амперные характеристики газа в зоне горения огневого стенда.

Эти эксперименты были проведены на лабораторном огневом стенде при сжигании коксика фракции  $-6+3$  мм. Скорость истечения воздуха из расположенной горизонтально фурмы находилась в пределах  $80-100$  м/сек, что обуславливало образование перед фурмой зоны циркуляции, поступление кокса в которую носит дискретный характер [14—15]. Ионизирующая добавка в виде водного раствора поташа вводилась в поток дутья у глаза фурмы. Близкий к пульсирующему характер горения при дискретном поступлении кокса predetermined известные трудности в оценке проводимости пламени при использовании обычных методов измерения. В связи с этим был применен несколько видоизмененный (рис. 3) метод А. П. Боронина и Т. Г. Игнатъевой [13] получения динамических вольт-амперных характеристик. Напряжение изменялось по синусоидальному закону от  $-12,5$  до  $+12,5$  в с частотой  $1000$  гц. Эта частота была выбрана для получения нескольких вольт-амперных характеристик за время между смежными возмущениями процесса горения, вызываемыми дискретным поступлением кокса в зону циркуляции.

Вольт-амперные характеристики (рис. 4) были получены этим методом при обычном режиме при введении в зону горения для увеличения ионизации газа поташа и при вдувании эквивалентного расхода раствора поташа количества воды. Последние контрольные эксперименты проводились, чтобы выяснить, как влияет охлаждение зоны горения на результаты измерений.

Как следует из сравнения динамических вольт-амперных характеристик (рис. 4, а), интенсивность горения оказывает определяющее влияние на величину проводимости. Последняя в момент максимальной интенсивности горения (индекс I) имела значения, более чем на порядок превы-

шающие значения при минимальной интенсивности (индекс  $II$ ). Отметим, что максимальная интенсивность горения, определявшаяся сопоставлением изменения яркостной температуры, проводимости газов и т. д., наблюдается вслед за поступлением очередной порции в зону циркуляции и уменьшается на протяжении периода времени между обрушениями. Введение поташа, естественно, увеличивало проводимость. При этом, как и ожидалось, различие между минимальным и максимальным значениями проводимости значительно уменьшалось — с 15—20 раз при естественной проводимости (индексы  $I'$  и  $II''$ ) до 3—3,5 раза при увеличении ионизации за счет термоионизации (индексы  $I$  и  $II$ ).

Заслуживает серьезного внимания увеличение проводимости газов при подаче в зону циркуляции воды (индексы  $I''$  и  $II'''$ ). Поскольку трудно допустить, что последнее связано с термической диссоциацией паров воды, так как этот процесс развивается сколь-нибудь существенно при значительно более высоких температурах, естественно предположение, что пары воды способствуют образованию в пламени сложных положительных и отрицательных ионов.

Отметим периодически наблюдающиеся аномально высокие значения проводимости и величины импульсов «электрического шума» при естественной ионизации, а также появление в ряде случаев вольт-амперных характеристик диодного типа (рис. 4, б).

Как следует из сравнения осциллограмм при естественной ионизации и при увеличении ее уровня за счет введения водного раствора поташа, спектр «электрического шума» в зоне интенсивного горения на отметках 30—60 мм не только не обогатился в последнем случае, но и в некоторой степени стал менее насыщенным (см. рис. 2). Показательно резкое, более чем в два раза, уменьшение коэффициентов парной корреляции колебаний давления дутья и «электрическим шумом» в промежуточном разрыхленном слое, где последний имеет наибольшие значения, при искусственном увеличении ионизации (рис. 5). В сопоставлении с не-

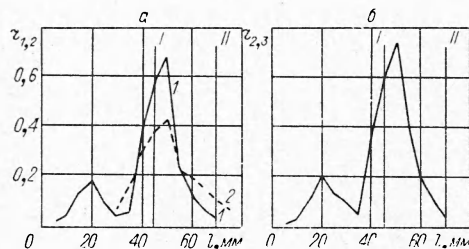


Рис. 5. Характер изменения коэффициента парной корреляции колебаний давления дутья и «электрического шума» (а), переменной составляющей яркостной температуры и «электрического шума» (б) по длине зоны горения при естественной 1 и повышенном 2 уровне ионизации.

$I$  — внутренняя граница промежуточного разрыхления слоя,  $II$  — граница промежуточного разрыхления слоя и малоподвижной массы кокса.

изменностью колебаний давления дутья это свидетельствует об отсутствии существенной связи «электрического шума» с турбулентностью, так же как и об ослаблении связи общей первопричины колебаний давления дутья и «электрического шума» с последним при введении в зону горения извне источника заряженных частиц. В то же время за пределами зоны интенсивного горения наблюдается увеличение амплитуды и большая испещренность сигнала при увеличении уровня ионизации за счет введения поташа, а коэффициент корреляции оказывается выше имевшего место при естественной ионизации.

Характерны в этом отношении и результаты экспериментов при увеличении концентрации кислорода в дутье. Имея в виду сохранение неизменной турбулентности струи при обычном и обогащенном (до 37%  $O_2$ ) дутье, скорость истечения его из фурмы поддерживалась в обоих случаях неизменной. Анализ осциллограмм электрического шума показывает, что обогащение



дутья кислородом, а соответственно и значительная интенсификация процесса горения, о чем свидетельствует увеличение на 150—200°C температуры в зоне циркуляции, привело к заметному росту амплитуды сигнала и обогащению его спектра в пределах области интенсивного горения.

Наконец, было установлено, что увеличение турбулизации струи различными завихрителями не отражалось на амплитуде или спектре «электрического шума».

Согласно этим результатам, предположение о том, что «электрический шум» пламени порождается преимущественно вследствие измененной степени ионизации газа, происходящих под воздействием нестабильности горения, можно полагать если не доказательным, то, по крайней мере, достаточно обоснованным.

Турбулентность же газового потока, по-видимому, ответственна за возникновение и характер «электрического шума» в той степени, в какой она соотносится с другими, определяющими интенсивность горения, факторами. Очевидно, в тех случаях, когда масштаб турбулентности соизмерим с размерами горящего комплекса или превышает его, как это имеет место в пламенах газообразного топлива, интенсивности горения и турбулентности изменяются однозначно, причем ведущей является турбулентность. В силу этого «электрический шум» выступает как показатель последней. Однако этот показатель чисто внешний и может рассматриваться лишь при условии постоянства прочих факторов, определяющих интенсивность горения и степень ионизации пламени. В случае же сжигания твердого топлива — пылеугольного в факеле, а тем более кускового в слое или в потоке дутья — влияние турбулентности на интенсивность процесса горения несравненно меньше. Показательно, что введение легкоионизируемой добавки способствовало обогащению спектра «электрического шума» лишь за пределы зоны циркуляции, где естественная ионизация за счет горения резко уменьшена, равно как и амплитуда исследуемого сигнала.

Таким образом, поскольку показана преимущественная зависимость «электрического шума» от интенсивности горения, следует рекомендовать использование этого явления для получения информации о динамике процесса горения. Последнее тем более целесообразно, что соответствующие зонды обладают такими неоспоримыми преимуществами перед другими контактными датчиками, как весьма малая инерционность и высокая стойкость, благодаря чему создается возможность проведения длительных непрерывных наблюдений за возмущениями процесса горения.

*Поступила в редакцию  
9/III 1971*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. S. Marsden. 4-th Symposium (International) on Combustion (Combustion and Detonation Waves). Baltimore, 1953.
2. R. S. Marsden. "Flame Turbulence Analyzer". Патент США, 2 820 945, 1958.
3. M. E. Gaignebet. C.r. Academie des Science, 1963, 256, 1.
4. С. И. Мухин. В сб. «Автоматизация оптимальных котельных», вып. 4, Л., 1965.
5. Б. С. Фиалков, В. Т. Плицын. Авторское свидетельство № 175 062, кл. 18—а, 5°; Бюллетень изобретений, 1965, № 19.
6. В. Т. Плицын, Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов. Изв. вузов. Черная металлургия, 1966, 10.
7. В. Т. Плицын, В. С. Фиалков, Я. И. Магун. ФГВ, 1968, 4, 1.
8. В. Т. Плицын, Б. С. Фиалков. Теплофизика высоких температур, 1968, 2.
9. S. Klein. Proc. 5-th Internat. Conference Ioniz Phenomena Cases, Mininch, 1961, v. 1; Amsterdam, N.—Holland Publ Co. 1962.
10. S. Klein. Rapp. CEA. 1968, 3437.

11. S. Klein, L. Sahni. С.г. Academie des Sciences, 1968, 267, 12.
12. В. Е. Анисимов. Канд. дисс. Воронежский университет, Воронеж, 1964.
13. А. П. Боронин, Т. Г. Игнатьева. В сб. «Физическая газодинамика и свойства газов при высоких температурах», М., «Наука», 1964.
14. Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов. Изв. вузов. Черная металлургия, 1961, 10.
15. Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов, Б. И. Микрюков. Сталь, 1963, 7.

УДК 536.46+662.614

## ВЛИЯНИЕ ПАРОВ ВОДЫ НА НОРМАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ПЛАМЕНИ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

*В. С. Бабкин, А. В. Вьюн*  
(Новосибирск)

Участие воды в процессах горения обусловлено, с одной стороны, тем, что на практике энергетическое топливо часто является влажным или высокообводненным. С другой стороны, введение пара или воды в реакционный объем позволяет в ряде случаев лучше организовать процесс и направить его в нужном направлении, например понизить температуру газа перед турбиной, обеспечить защиту камер сгорания от воздействия высоких температур.

Вместе с тем следует отметить, что принципиальная сторона вопроса — роль воды в тех или иных процессах горения — изучена крайне недостаточно. Наряду с распространенными представлениями о воде как о чисто инертном компоненте или поглотителе тепла существуют мнения, согласно которым вода принимает активное промотирующее участие при химических превращениях. При горении угля вода, как полагают, активно содействует процессу окисления, увеличивает суммарную скорость выгорания [1]. Добавка воды увеличивает в определенных условиях скорость окисления этана [2] и горения водорода [3]. Наконец, скорость горения окиси углерода, как известно, в значительной степени определяется величиной добавки воды.

Вряд ли можно ожидать однозначного ответа для процессов, протекающих при разных условиях. Добавка воды, вследствие ее большой теплоемкости, приводит к сильному понижению температуры. С другой стороны, при ее диссоциации образуются активные атомы О и Н и радикал ОН, способные сильно ускорять реакцию. Высокая излучательная способность воды также в некоторых условиях может дать существенный эффект.

В связи с этим представляет интерес исследовать влияние добавок на элементарное явление горения — ламинарное пламя метана в важной для современной техники области — при высоких давлениях и широком диапазоне добавок воды.

### Результаты экспериментов

Нормальная скорость пламени определялась методом начального участка и рассчитывалась по формуле

$$S_u = S/E_i, \quad (1)$$

где  $E_i = \sum m_b T_b / \sum m_i T_i$  — коэффициент расширения продуктов сгорания,  $\sum m_b, T_b$  и  $\sum m_i, T_i$  — общее число молей и температура продуктов сгорания и свежей смеси;  $S$  — видимая скорость пламени [4, 5]. Для опре-