

**ОБ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРИ ГОРЕНИИ КОКСА  
В ПОТОКЕ ВОЗДУХА**

*В. Т. Плицын, Б. С. Фиалков, Я. И. Магун*

*(Караганда)*

Рядом исследований [1, 2] установлено, что поступление кокса в очаг горения доменной печи при его циркуляции здесь в потоке воздуха и продуктов горения<sup>1</sup> происходит дискретно в результате обрушений динамически неустойчивых сводов с частотой порядка 10 *гц*, вызывая соответствующие колебания давления. Однако влияние этих квазипериодических возмущений на процесс горения оставалось неизвестным, поскольку применяемые методы исследований [5] инерционны.

В этой связи особый интерес представляет безынерционный метод исследования пламен, основанный на измерении их электропроводности. Настоящая работа является, по-видимому, первой попыткой применения данного метода для изучения неустойчивости процесса горения твердого топлива в потоке дутья и, в частности, кокса в доменной печи.

Следует отметить, что применение для этой цели метода зондов, практически единственно возможного из всех остальных и представленного в литературе двумя модификациями, встретило известные трудности. Так, двухконтактные датчики с неподвижными электродами, постоянно находящимися в пламени [6—8], оказались непригодными из-за воздействия на электроды высоких температур (до 2273° К), образования сажистых цепочек в межэлектродном промежутке и т. д. С другой стороны, «метод прострела» [9, 10] для изучения неустойчивости процесса горения вообще мало пригоден.

Учитывая эти обстоятельства, а также специфику исследования зоны горения доменной печи, был разработан датчик, в котором электроды постоянно находятся в зоне горения и в момент измерений неподвижны, но в то же время приняты меры для устранения явлений, возникающих при длительном пребывании электродов в пламени. Датчик (рис. 1) состоит из двух алюмелевых электродов 1 диаметром 1,2 *мм* каждый, концы которых заключены в кварцевые трубки 2 и соприкасаются с ионизированными частицами только своими торцевыми поверхностями, расстояние между которыми 6 *мм*. Кварцевые трубки закреплялись керамикой 3 в направляющей фигурной втулке 4, сочлененной с полым штоком 5, внутри которого проходят изолированные электроды. Чтобы обеспечить длительное пребывание датчика в зоне горения, его помещают в водоохлаждаемую трубу 6, обычно применяемую для отбора проб газа или измерения температуры. Электроды после введения датчика в зону горения через специальное сальниковое устройство устанавливаются в рабочее положение с помощью штока 5.

<sup>1</sup> Исследованиями [3—5] показано, что в современных условиях нормальной работе доменной печи отвечает горение в этом режиме.

Электроды обдувались сжатым воздухом в перерыве между двумя измерениями. Время перерыва в подаче охлаждающего воздуха могло меняться в широких пределах, а в проведенных экспериментах не превышало 0,65 сек.

В то же время охлаждением межэлектродной области в момент замера в результате подачи сжатого воздуха, по-видимому, следует

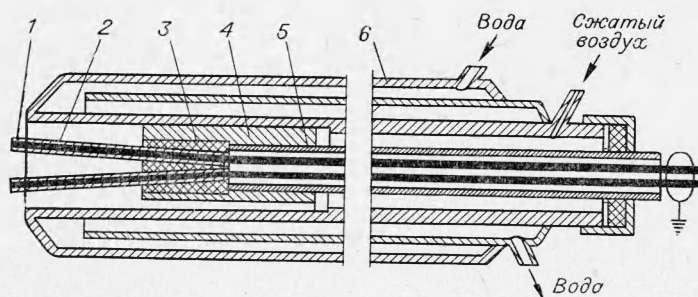


Рис. 1. Схема датчика.

пренебречь из-за малой по отношению к зоне горения доли теплосодержания охлаждающего воздуха (не более 0,01), интенсивного движения газового потока в зоне горения и поэтому почти мгновенного восстановления теплового состояния прилегающего к зонам участка. Об этом свидетельствует характер полученных осциллограмм тока проводимости (рис. 2), где отчетливо видно, что время нарастания сигнала от условной нулевой линии до максимального значения не превышает 0,2 сек после выключения сжатого воздуха. Поэтому в расчет принимались только те значения тока проводимости, которые отстояли от первоначально возникшего сигнала на время не меньше 0,1-0,2 сек.

Контрольными экспериментами было установлено, что электропроводность материалов, изолирующих электроды датчика, в условиях эксперимента практически не меняется или, по крайней мере, изменения находятся в зоне нечувствительности измерительной аппаратуры. Примененный в этом эксперименте датчик отличался от описанного выше тем, что кварц полностью изолировал электроды от зоны горения.

Питание цепи датчика осуществлялось постоянным напряжением 5 в. Ток проводимости повышался усилителем постоянного тока с симметричным входом и фиксировался с помощью светолучевого осциллографа. Усилитель имеет следующие характеристики: коэффициент усиления по току — 500 при входном сопротивлении 4,65 ком; выходной ток до 22 ма, линейность до 14 ма. Питание усилителя стабилизировано.

Электропроводность высокотемпературных газов в зоне горения доменной печи Карагандинского металлургического завода измерялась в точках, расположенных по оси воздушной фурмы через 125 мм от ее торца. Поскольку [1, 2] дискретное поступление кокса в зону горения вызывает возмущение в потоке воздуха, подаваемого в нее, параллельно с измерением электропроводности фиксировались колебания давления дутья при помощи пьезокристаллического датчика.

Горение кокса в проведенных экспериментах<sup>1</sup> происходило в основном в циркуляционном режиме, о чем свидетельствовали как характер изменения состава газа по оси воздушной формы (см. таблицу), так и

<sup>1</sup> В проведении экспериментов принимали участие С. М. Нартов, Р. З. Жалеев, Н. Г. Ракитин.

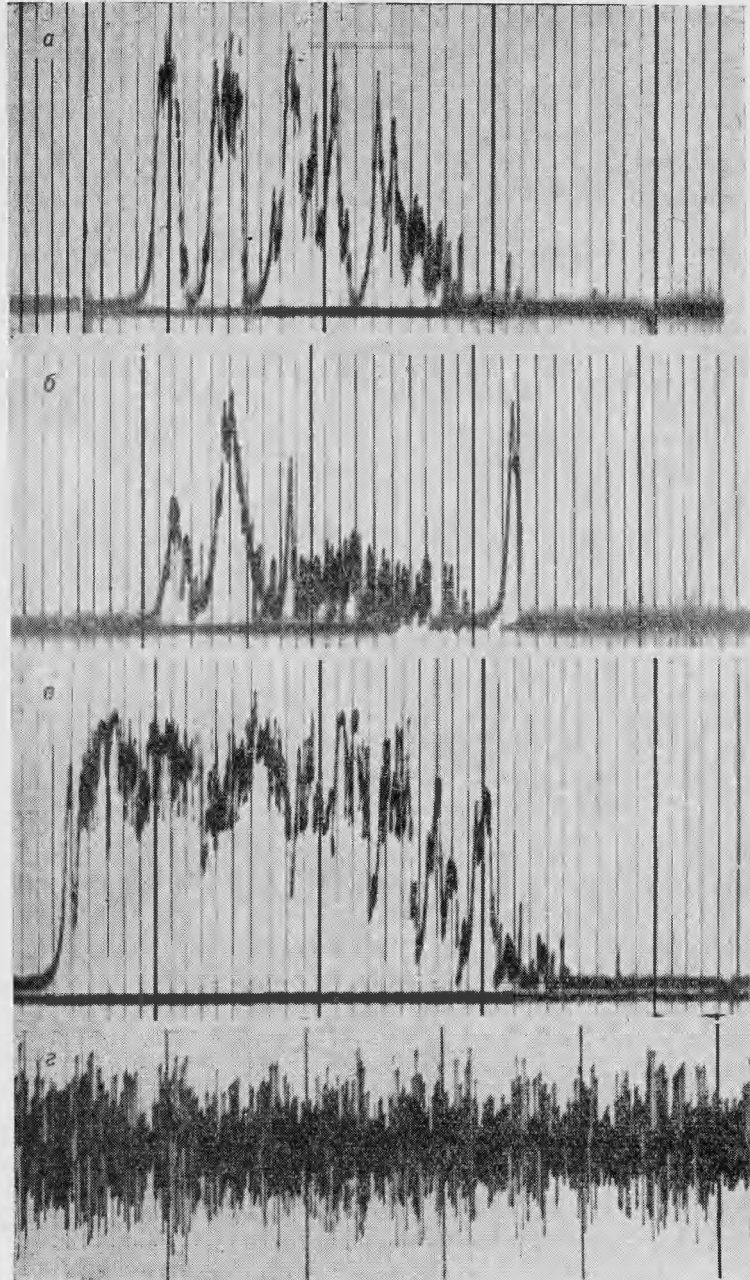


Рис. 2. Осциллограмма тока проводимости газов (а, б, в) и колебаний давления воздуха (г), поступающего в зону горения (отметчик времени: 50 мкс; крайний импульс справа — срабатывание соленоидного клапана).

Изменение состава газа в зоне горения доменной печи

Содержание компонентов, %	Расстояние от торца фурмы, м						
	0,0	0,25	0,50	0,75	1,0	1,25	1,50
O <sub>2</sub> *	19,6 19,5	5,0 5,2	9,0 2,7	6,1 0,5	1,7 0,0	0,6 0,0	— —
CO <sub>2</sub> *	0,2 1,3	12,0 13,4	8,8 14,5	9,5 1,0	12,5 0,0	4,7 0,0	— —
CO*	0,4 0,0	1,4 1,1	0,2 2,7	0,7 32,9	3,8 33,4	24,7 37,2	39,0 39,8

\*Первые цифры—горение кокса в циркуляционном режиме; вторые—горение в слое.

присутствие в спектре колебаний давления дутья низкочастотной составляющей (1,5—20 *гц*), обусловливаемой периодическими изменениями газопроницаемости зоны горения. Расход воздуха, поступающего в зону горения с температурой 1370° К и давлением  $p_{изб} = 0,28 \text{ Мн/м}^2$ , составлял в среднем 3  $\text{м}^3/\text{сек}$ . Яркостная температура очага горения изменялась в пределах 2080—2200° К. Многими исследованиями [5, 11, 12] было установлено, что температура, измеренная термопарами, обычно в начале зоны горения находится в диапазоне 1480—2070° К, затем повышается и на расстоянии 0,50—1,20 м достигает 2170—2370° К. После максимума температура плавно убывает и на расстоянии 3 мм составляет 1670—1770° К. Состав газа в различных точках зоны горения изменялся в пределах от 50 до 100%.

Анализ полученных осциллограмм тока проводимости и давления газов в зоне циркуляции (см. рис. 2) показывает, что спектры колебаний этих параметров имеют много общего: несущие колебания с частотой 70 *гц* и выше промодулированы колебаниями, изменяющимися в диапазоне<sup>1</sup>  $\sim 2 \div 20 \text{ гц}$ . В большинстве случаев спад электропроводности происходит до значений, соответствующих положению зонда в воздухопроводе. Однако колебания электропроводности нельзя объяснить лишь колебаниями давления, поскольку эти параметры связаны обратно пропорциональной зависимостью [13], а проведенные эксперименты показали, что электропроводность изменяется примерно в 40 раз, в то время как давление — 4 раза.

Изучение механизма поступления кусков сухого льда размером 5—8 мм в зону циркуляции на модели со стеклянными стенками с применением ускоренной киносъемки показало, что после обрушения динамически неустойчивого свода над зоной наблюдается временное ее «переполнение». В процессе движения избыточные куски частично газифицируются, а частично расходуются на построение нового свода, чем и обеспечивается постоянство загрузки зоны циркуляции во времени. При этом обрушению свода отвечает колебание давления воздуха, происходящее на фоне значительно более высокочастотных несущих колебаний.

На основании изложенного выше можно считать, что низкочастотные колебания электропроводности газов с частотой  $\sim 2 \div 20 \text{ гц}$ , по всей вероятности, отражают возмущения процесса горения в результате квазипериодического изменения соотношения воздух—топливо в зоне циркуляции, обусловленного дискретным поступлением топлива.

<sup>1</sup> Нижний предел установить не удалось из-за ограниченной продолжительности времени одного замера.



Изменения тока проводимости достигают 97%, что указывает на значительную величину возмущения, вызываемого дискретным поступлением кокса.

С целью уточнения взаимосвязи между низкочастотными колебаниями тока проводимости и давления газов необходимо было получить осциллограммы этих параметров за пределами зоны циркуляции. Однако электроды датчика (рис. 1) при передвижении в слое кокса быстро ломаются. Для устранения этого был испытан на огневом стенде и в доменной печи двухэлектродный датчик<sup>1</sup> без источника внешней э. д. с. [14]. Характер переменной составляющей напряжения, возникающего на нагрузочном сопротивлении электродов, определяется степенью

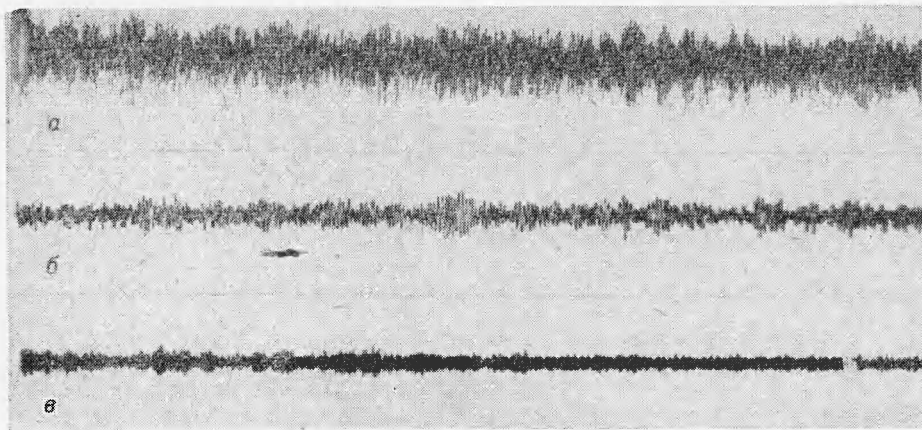


Рис. 3. Изменение характера колебаний давления газов по длине зоны горения: а — в пределах зоны циркуляции; б — в промежуточном «ползущем» слое; в — в малоподвижной массе кокса.

постоянства концентрации заряженных частиц в данной точке пламени и ее газодинамики [15]. Сопоставление формы и характера колебаний в различных точках пламени пропан—бутан и твердого топлива, наблюдаемых как при измерении тока проводимости, так и переменной составляющей напряжения, возникающего на нагрузочном сопротивлении зонда без источника внешней э. д. с., показывает, что информация о ходе, по крайней мере, нестационарных процессов в пламени аналогична и во втором случае не зависит от сопротивления керамики между электродами. Поэтому при измерениях в слое применялся датчик без источника внешней э. д. с.

Для фиксирования колебаний давления газов по длине зоны горения был использован акустический зонд, состоящий из пьезокристаллического датчика, водоохлаждаемой звукопроводящей трубы, усилителя, осциллографа и системы предохранения последней от засорения. Результаты экспериментов показали, что на расстоянии 0,50–1,10 м от торцевой поверхности воздушной формы, т. е. в пределах зоны циркуляции, амплитуда и характер колебаний давления газов и переменной составляющей напряжения, возникающего на нагрузочном сопротивлении зонда без источника внешней э. д. с. (рис. 3, а; 4, а) не претерпе-

<sup>1</sup> Один электрод датчика из жароупорного металла диаметром 6 мм размещается в центре другого, выполненного в виде водоохлаждаемой трубы с внутренним диаметром 18 мм, и тщательно заземленного. Центральный электрод изолируется огнеупорным материалом как от трубы, так и от пламени.

вают существенных изменений. Частоты модулирующих колебаний измеряемых параметров совпадают.

По мере удаления от границы зоны циркуляции амплитуда колебаний обоих параметров уменьшается и на расстоянии в среднем 1,5 м становится сопоставимой с помехой усилителя (рис. 3, б, в; 4, б, в). Это

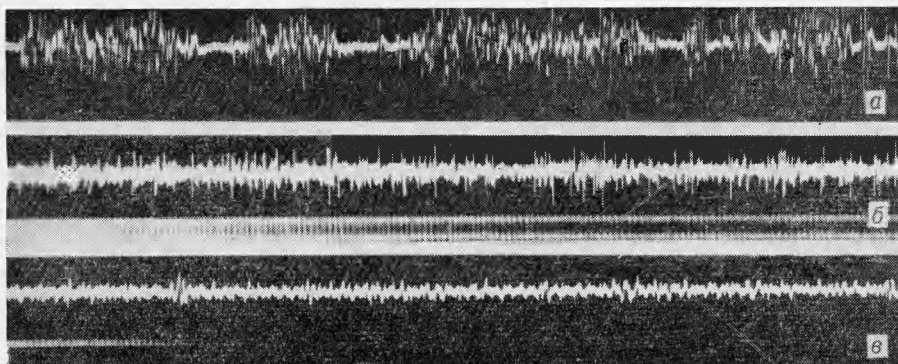


Рис. 4. Изменение характера колебаний переменной составляющей напряжения на нагрузочном сопротивлении зонда без источника внешней э. д. с.

а — в пределах зоны циркуляции; б — в промежуточном «ползущем» слое; в — в малоподвижной массе кокса.

может быть объяснено тем, что на процесс горения и газодинамику в слое влияние обрушений динамически неустойчивых сводов над зоной циркуляции и дискретного поступления кокса в последнюю ослабляется вследствие демпфирующего действия слоя кокса.

При обратном движении трубы наблюдается воспроизведение описанной картины. В тех случаях, когда горение кокса происходило в слое (см. таблицу), характер полученных осциллограмм уже в начале зоны горения соответствовал представленным на рис. 4, б, в.

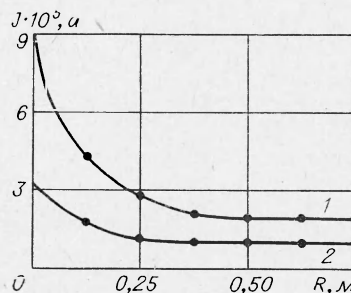
Таким образом, можно сделать вывод, что колебания тока проводимости с частотой  $\sim 2-20$  гц обусловлены нестабильностью процесса горения кокса в зоне циркуляции в результате дискретности его поступления, а причина колебаний давления газов — обрушения динамически неустойчивых сводов.

Глубина модуляции тока проводимости в различных точках зоны циркуляции различна и уменьшается в направлении ее конца до 44%, а частота изменяется во времени, что подтверждает неоднородность отдельных участков очага горения и нестабильности в нем процесса горения кокса.

Результаты обработки осциллограмм тока проводимости, полученные при различном тепловом состоянии горна доменной печи в целом и исследуемой зоны горения в частности (в результате дополнительной подачи водяного пара при относительном постоянстве остальных пара-

Рис. 5. Изменение тока проводимости  $J$  по длине зоны горения  $R$  при различном тепловом состоянии горна доменной печи.

1 — содержание кремния в чугунае  $0,95 \div 1,19\%$ ; 2 — содержание кремния в чугунае  $0,76 \div 0,83\%$ .



метров дутья), представлены на рис. 5. Из его рассмотрения следует, что электропроводность уменьшается во всех точках зоны циркуляции при охлаждении очага горения. По мере приближения к концу зоны циркуляции абсолютная разница токов проводимости при различном тепловом состоянии очага горения уменьшается с  $6,5 \cdot 10^{-5}$  до  $1,0 \cdot 10^{-5} a$ .

Отсутствие каких-либо данных о замерах электропроводности при горении твердого топлива в потоке воздуха, концентрации элементов с низким потенциалом ионизации в продуктах горения зоны циркуляции не позволяет в настоящее время говорить об однозначной зависимости между тепло-техническими параметрами процесса горения кокса в доменной печи, с одной стороны, и электропроводностью. Полученные результаты указывают на то, что такая связь существует, но для ее выявления необходимы дополнительные лабораторные и заводские исследования.

Проведенные эксперименты свидетельствуют об относительно высокой электропроводности в зоне циркуляции доменной печи. Максимальный ток проводимости достигает  $10^{-4} a$ . Поскольку в известной нам литературе не содержится никаких данных об электропроводности при горении твердого топлива, не представляется возможным сопоставить полученные результаты с данными других исследователей. Однако полученные значения тока проводимости не противоречат приводящимся в работе [16] сведениям об увеличении электропроводности при добавке твердого топлива в газовый факел.

Поступила в редакцию  
27/VI 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов, Б. Н. Микрюков. *Сталь*, 1963, 7, 586—588.
2. Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов. *Изв. высш. уч. зав. Черная металлургия*, 1961, 10, 19.
3. J. V. Elliot, R. A. Buchanan, J. V. Wagstaff. *Journal of Metals*, 1952, 4 (7), 709.
4. И. П. Бардин и др. *Изв. АН СССР, ОТН*, 1955, 1, 80, 5.
5. Л. М. Цылев, Я. М. Остроухов, Л. З. Ходак. *Процесс горения кокса в доменной печи*. Металлургиздат, 1960.
6. H. A. Wilson. *Rev. Mod. Phys.*, 1931, 3, 156.
7. F. L. Tufts. *Phys. Zeitschr.*, 1904, 3, 76.
8. А. Е. Кадышев. *Изменение температуры пламени*. Металлургиздат, 1961.
9. В. С. Россихин, Н. А. Нестерко. *ЖФХ*, 1957, 31, 12, 2663.
10. К. П. Власов, Н. Н. Иноземцев. *Третье Всесоюзное совещание по теории горения*. Т. 1, 1960, 60.
11. И. З. Козлович. *Процессы восстановления и окисления в мощных доменных печах*. Металлургиздат, 1951.
12. В. А. Хромов. *Бюлл. науч.-техн. инф. Украинского науч.-исслед. ин-та металлов*, 1958, 7, 22.
13. В. Е. Анисимов. *Канд. дисс. Воронеж*, 1964.
14. В. Т. Плицын, Б. С. Фиалков. *Авт. свид.*, № 175062, 25 августа 1964 г.
15. R. S. Marsden. *Fourth Symposium (International) on Combustion, Baltimore*, 1953.
16. Б. В. Канторович, Р. Н. Питин, К. И. Чередкова. *Сб. «Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения»*. М., Изд-во «Наука», 1965, 112.