

$$\frac{dC_{NO}}{R\tau} = 3,34 \cdot 10^{13} \left[\sqrt{\frac{C_{O_2}}{T}} C_{N_2} e^{-\frac{129000}{RT}} \right] \quad (2)$$

При интегрировании уравнения (2) расстояние $R_0 - R$ разбивалось на отдельные участки, на каждом из которых концентрация O_2 и температура считались постоянными величинами. Расчет количества NO , образовавшегося при горении коксового остатка, также проводился в соответствии с уравнением (2), при этом время горения определялось по формуле (см., например, [4])

$$\tau_k = \frac{\rho R_0}{\beta C_{O_2} \alpha} + \frac{\rho R_0^2}{2D\beta C_{O_2}}, \quad (3)$$

где ρ — плотность угля; $кг/м^3$; R_0 — начальный радиус частицы, $м$; β — стехиометрический коэффициент реакции окисления углерода; α — суммарная константа скорости, $м/с$; D — коэффициент диффузии, $м^2/с$. Согласно приведенным (1) — (3), время выхода летучих в рассматриваемом случае $\tau = 0,1$ с, а время горения коксового остатка $\tau_k = 2$ с.

Распределение концентрации и температур на рисунке дано для момента времени $0,02$ с с начала процесса выхода летучих. Проведенные оценочные расчеты показали, что кратковременное локальное повышение температуры при горении летучих не дает существенного вклада в количество образующихся окислов NO_x в высокотемпературных топках. Однако для топок с низкой температурой горения, например для топок с кипящим слоем, где температура около 1500 К, и во время выхода и горения летучих локальное повышение температуры достигает $300-400^\circ$, количество образующихся при этом окислов превосходит количество NO , образующихся в объеме при горении коксового остатка.

Выход NO за время горения коксового остатка 2 с в объеме при средней температуре в топке 1500 К, рассчитанный по формуле (2) составляет $0,2$ г/норм $\cdot$ $м^3$. При горении летучих при средней температуре в топке около 1500 К образуется $0,018$ г/норм $\cdot$ $м^3$ NO .

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наряду с известными механизмами образования NO (в объеме и за счет азота топлива) в низкотемпературных топках необходимо учитывать образование окиси азота при горении летучих.

Поступила в редакцию
10/1 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Л. А. Франк-Каменецкий. Окисление азота при горении. М., Изд-во АН СССР, 1947.
2. Т. В. Виленский, Д. М. Хзмоляи. Динамика горения пылевидного топлива. М., Энергия, 1978.
3. В. И. Бабий, А. Г. Серебрякова и др. Теплоэнергетика, 1977, 1.
4. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М., Изд-во МГУ, 1957.

РАСЧЕТ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГАЗОВЫХ ГОРЕЛОК

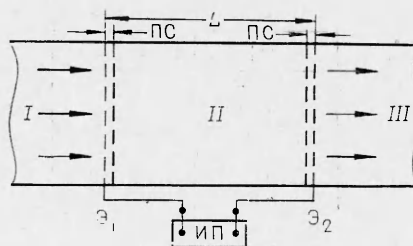
Б. Г. Дьячков, Е. А. Пацков, И. Я. Полонский
(Москва)

При промышленном использовании электрогазовых горелок, сочетающих процесс сжигания топлива с электрическим усилением пламени, массовый расход теплоносителя, его температура и состав определяются требованиями технологического процесса. Для выбора электрогазовой горелки, обеспечивающей требуемые параметры продуктов сгорания, необходимо проведение предварительного расчета по приведенной ниже методике, в основе которой лежит определение вольтамперной характеристики электрического разряда в зависимости от ряда определяющих параметров.

Расчетная схема простейшей однофазной электрогазовой горелки представлена на рис. 1. Предполагается мгновенное сгорание топлива на входе в разрядный промежуток при стехиометрическом соотношении реагентов, однородность профиля температуры по сечению и длине камеры сгорания и равномерность распределения лег-

Рис. 1. Расчетная схема
прямоточной электрога-
зово́й горелки.

I — горючая смесь с лег-
коионизируемой добавкой;
II — разрядная зона; *III* —
поток продуктов сгорания,
усиленных электроэнергией.
L — межэлектродный про-
межуток; $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ — элект-
роды; ИП — источник вы-
соковольтного электропи-
тания постоянным током;
ПС — приэлектродные слои.



коионизируемой присадки в пламени. Постоянное равномерное электрическое поле накладывается на продукты сгорания между плоскими газопроницаемыми водоохлаждаемыми электродами.

Разрядный промежуток включает в себя основной участок (ядро потока), в котором происходит выделение полезной электрической энергии, и области приэлектродных падений потенциала, учет которых при расчете вольтамперных характеристик весьма затруднителен, в то время как определить падение напряжения в ядре потока достаточно просто при условии термодинамического равновесия системы. Ядро потока — это нелинейное сопротивление в электрической цепи, поскольку по мере роста мощности электрического разряда в связи с ростом температуры и степени термической ионизации присадки увеличивается проводимость продуктов сгорания. Поэтому для расчета вольтамперных характеристик электрического разряда необходимо знать зависимость величины электропроводности продуктов сгорания от температуры, давления, концентрации легкоионизируемой присадки, коэффициента избытка воздуха. Поскольку в литературе отсутствуют достаточно полные экспериментальные данные о такой зависимости, проведен соответствующий расчет по методике, изложенной в работе [1].

Для определения удельной проводимости использовалось выражение Чепмена — Каулинга

$$\sigma = 0,325 \cdot 10^{-7} \frac{n_e}{\sqrt{T} \sum_{j=1}^3 n_j Q_{ej}} \text{ См/м,}$$

где $\sum_{j=1}^3 n_j Q_{ej}$ — полное сечение столкновения электронов с атомами и ионами;

n_e — концентрация электронов; T — температура. При расчете полного сечения столкновений учитывались сечения столкновений электрона с нейтральными атомами продуктов сгорания (Q_{en}), нейтральными атомами присадки (Q_{eg}) и ионами (Q_{ei})

$$\sum_{j=1}^3 n_j Q_{ej} = n_n Q_{en} + n_g Q_{eg} + n_e Q_{ei}.$$

Здесь n_n , n_g — концентрация атомов продуктов сгорания и присадки соответственно.

Состав продуктов сгорания природного газа при различных температурах и коэффициентах избытка воздуха определялся по данным [2], а величины сечений столкновений электрона с различными компонентами продуктов сгорания представлены в работе [3].

Кулоновское сечение иона калия находилось по выражению Спитцера — Эллиса

$$Q_{ei} = \frac{2,52 \cdot 10^{-6}}{T^2} \ln 0,873 \cdot 10^4 \left(\frac{r^{3/2}}{n_e^{1/2}} \right).$$

Концентрация свободных электронов в продуктах сгорания определялась в предположении термодинамического равновесия с использованием уравнения Саха

$$n_e = 7,335 \cdot 10^{21} \frac{\varepsilon p}{T} \sqrt{\frac{K_p(T)}{\varepsilon p + K_p(T)}},$$

где ε — объемная концентрация щелочного металла присадки; p — давление; $K_p(T) = 3,31 \cdot 10^{-7} T^{5/2} \exp\left(-\frac{11600 V_i}{T}\right)$ — константа равновесия при ионизации атомов щелочного металла, где V_i — потенциал ионизации атомов присадки, равный в случае калия 4,34 эВ.

T, К	σ, См/м		
	[4]	Формула (1)	[5]
2200	$5,164 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$0,875 \cdot 10^{-3}$
2600	$3,436 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$0,991 \cdot 10^{-2}$
3000	$1,248 \cdot 10^{-1}$	$1,006 \cdot 10^{-1}$	$0,588 \cdot 10^{-1}$

В величины электропроводности, полученные в соответствии с описанной методикой, вносилась поправка, учитывающая наличие в продуктах сгорания природного газа значительного количества гидроксильного радикала OH, уменьшающего концентрацию электронов, а следовательно, и электропроводность в резуль-

тате захвата электронов и образования молекул КОН. Для определения поправочного коэффициента соответствующие химические реакции рассматривались совместно с уравнениями сохранения заряда и полной концентрации атомов щелочного металла.

Расчет электропроводности продуктов сгорания с применением ЭВМ «Напри-2» проводился при температурах 1800–3000 К, коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 0,4 \div 1$ и при парциальных давлениях калия $5 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^{-3}$. Результаты расчетов обобщены следующим уравнением:

$$\sigma = 8,25 \cdot 10^5 \exp\left(-\frac{27490}{T}\right) [K]^{0,5} \alpha^{0,79} \cdot 10^{-3} T^{-2,29}. \quad (1)$$

Здесь концентрация K взята в процентах.

Максимальное отклонение величин электропроводности, определенных по аппроксимационной формуле, от полученных при расчете на ЭВМ составляет 10%. Использование уравнения (1) позволяет учесть нелинейность сопротивления ядра потока.

Сравнение с данными [4, 5] по электропроводности продуктов сгорания природного газа, проведенное при объемной концентрации калия $10^{-4}\%$ и $\alpha=1$, показали, что полученные с использованием (1) результаты занимают промежуточное положение между данными [4, 5]. Результаты сравнения представлены в таблице.

Обычно при расчете нелинейных электрических цепей используется метод «припасовывания» тока. В нашем же случае удобнее использовать припасовывание температуры. При этом необходимо знание величины теплосодержания продуктов сгорания на каждом выбранном температурном уровне. Для этого можно воспользоваться результатами работы [6], которые аппроксимируются уравнением

$$H = 1215,8 - 1,684 T + 4,962 \cdot 10^{-4} T^2. \quad (2)$$

Погрешность определения теплосодержания по формуле (2) при высоких температурах не превышает 2%.

По существу, уравнения (1) и (2) с привлечением конкретных расходных и геометрических характеристик электрогазовой горелки позволяют рассчитать вольт-амперные характеристики разряда в ядре потока. Вначале определяется теплосодержание продуктов сгорания при теоретической температуре горения, и эта величина служит базой для дальнейших расчетов. Далее задается приращение температуры в ядре потока ΔT , которое целиком обуславливается величиной подведенной электрической энергии, зависящей от сопротивления ядра потока, определяемого выражением (1). Для построения вольтамперной характеристики достаточно выбрать, например, приращение температуры 100°C с тем, чтобы в 8–10 этапов охватить весь диапазон работы электрогазовой горелки.

Для расчета вольтамперных характеристик приэлектродных слоев из-за отсутствия каких-либо литературных данных можно воспользоваться обобщающим выражением для электрических составляющих тепловых потерь на электродах электрогазовой горелки, приведенным в работе [7]. Предполагается, что теплотери на электродах целиком определяются падением потенциала в пограничных слоях. Таким образом, суммирование падения потенциала в ядре потока и в приэлектродных слоях позволяет получить вольтамперную характеристику всего разрядного промежутка.

Проверка изложенного выше подхода к определению вольтамперных характеристик электрогазовых горелок осуществлена с использованием экспериментальных данных, полученных в [5] при исследованиях электрогазовой горелки, работающей на постоянном токе. Выбор именно этих данных обусловлен тем, что здесь весьма точно с использованием оптических методов измерялись концентрация легкоioni-зуемой присадки и температура продуктов сгорания.

На рис. 2. представлены три вольтамперные характеристики разряда: 1 — получена в работе [5], 2 — рассчитана по опи-

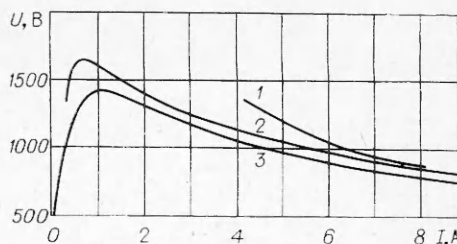


Рис. 2. Вольтамперные характеристики разряда [5].

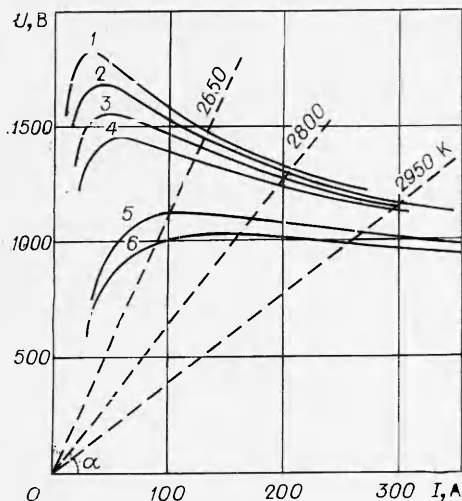


Рис. 3. Вольтамперные характеристики разряда в зависимости от начальной температуры продуктов сгорания и линии равных температур продуктов сгорания ($V_r = 35 \text{ м}^3/\text{ч}$, $\alpha = 1$, $k = 2,5$, $[K] = 0,05\%$).
 1 — $T_H = 2050 \text{ K}$; 2 — $T_H = 2100 \text{ K}$; 3 — $T_H = 2150 \text{ K}$; 4 — $T_H = 2200 \text{ K}$; 5 — $T_H = 2383 \text{ K}$ ($T_B = 400^\circ \text{C}$); 6 — $T_H = 2452 \text{ K}$ ($T_B = 600^\circ \text{C}$).

санной выше методике, 3 — разновидность второй характеристики с учетом лишь ядра потока. При величинах тока разряда, превышающих 8 А, наблюдается практически полное совпадение расчетной (2) и экспериментальной (1) вольтамперных характеристик.

Ранее отмечалось, что расчет вольтамперных характеристик основан на предположении о равномерном распределении температуры по длине камеры сгорания. На самом деле, лишь по достижении определенных значений тока разряда (в данном случае $I = 8 \text{ А}$), благодаря интенсифицирующему воздействию разряда на процесс горения топлива, температурный профиль по длине камеры сгорания выравнивается, и температура на срезе горелки становится равной температуре во всем промежутке между электродами.

По изложенной выше методике с использованием ЭВМ определялись падение потенциала в ядре потока и в приэлектродных слоях (у соплового и центрального электродов), общее падение напряжения в разрядном промежутке, КПД преобразования электрической энергии в тепловую в пределах разрядной зоны, удельная электрическая мощность, преобразуемая в тепловую энергию в камере сгорания горелки. При расчете выбраны следующие исходные данные, характеризующие прямоточную однофазную электрогазовую горелку:

- 1) расход природного газа при стехиометрическом соотношении реагентов $V_r = 10,35$ и $100 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- 2) геометрический параметр $k = 2,5$ и 4 представляет собой отношение длины межэлектродного промежутка к диаметру камеры сгорания;
- 3) молярное содержание калия в продуктах сгорания составляет $5 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $5 \cdot 10^{-3}$, $1 \cdot 10^{-2}$, $5 \cdot 10^{-2}$ и $1 \cdot 10^{-1}\%$;
- 4) начальные температуры продуктов сгорания — теоретическая ($T_H = 2200 \text{ K}$) и соответствующая подогреву воздуха $T_B = 400$ и 600°C . В каждом случае учитывалось возможное начальное снижение температуры за счет теплопотерь на 50, 100 и 150°C .

Общее количество рассчитанных вариантов при различных исходных условиях составило 4320.

На рис. 3, 4 представлены вольтамперные характеристики электрогазовой горелки в зависимости от начальной температуры продуктов сгорания и содержания калия в продуктах сгорания.

Полученные расчетные данные после соответствующего обобщения могут быть использованы для анализа работы электрогазовых горелок (КПД, условия устойчивости разряда), для выбора оптимальных режимов их работы, а также для предва-

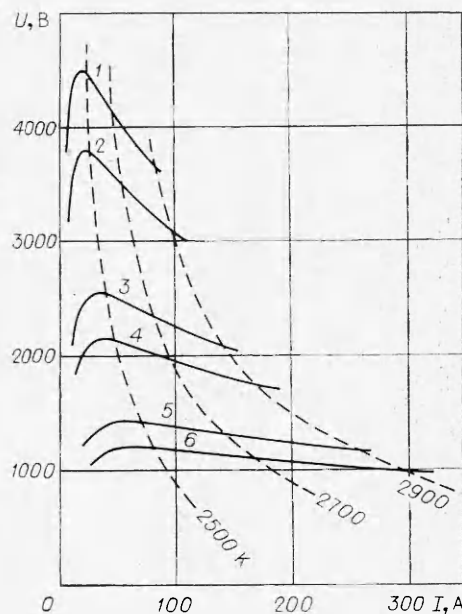


Рис. 4. Вольтамперные характеристики разряда при различных содержаниях калия в продуктах сгорания и линии равных температур продуктов сгорания.

$$V_r = 35 \text{ м}^3/\text{ч}, k = 2,5, T_H = 2200 \text{ K}; [K], \%: 1 - 5 \cdot 10^{-4}, 2 - 10^{-3}, 3 - 5 \cdot 10^{-3}, 4 - 10^{-2}, 5 - 5 \cdot 10^{-2}, 6 - 10^{-1}.$$

рительного расчета систем автоматического регулирования. Полученные данные особенно необходимы для согласования характеристик электрогазовых горелок и источников их электропитания.

Поступила в редакцию
26/II 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Я. Полонский. — В сб.: Использование газа, подземное хранение нефти и газа. Вып. 8—9. М., Недра, 1977.
2. И. Н. Карп, Б. С. Сорока и др. Продукты сгорания природного газа при высоких температурах (состав и термодинамические свойства). Киев, Техника, 1967.
3. Л. Фрост. Вопросы ракетной техники, 1962, 7.
4. Н. Н. Гринченко. Автореф. канд. дис. Киев, 1974.
5. Н. К. Мамина, М. Г. Нефедова и др. ФГВ, 1974, 10, 2.
6. А. В. Недоспасов, Л. П. Побережский, Ю. Г. Чернов. Состав и свойства рабочих тел МГД-генераторов открытого цикла. М., Наука, 1977.
7. Б. Г. Дьячков, Г. А. Заидаев. Газовая промышленность, 1976, 10.

О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ИЗЛУЧЕНИЕ РАДИКАЛОВ C_2^* И CH^* В УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛАМЕНАХ

А. Б. Фиалков, В. К. Муравлев, Б. С. Фиалков
(Караганда)

Выявление роли и места электронно-ионных явлений в процессе горения и влияние на последний электрических полей создает предпосылки как для углубления представлений о ходе процесса, так и для разработки способов и средств контроля и управления им.

Источником первичных ионов в пламени принято считать возбужденные радикалы CH^* и C_2^* , образующиеся в результате химической реакции в углеводородных пламенах [1]. В то же время, на них, по-видимому, заканчивается относительно медленный этап цепной реакции горения, при котором происходит развал топливных молекул и синтез новых углеводородов и начинается этап быстрых реакций, протекающих с участием активных частиц. В связи с этим и предпринята настоящая попытка установления характера влияния внешнего электрического поля на интенсивность излучения радикалов.

Эксперименты проводились на спектрографе ИСП-51 с фотоэлектрической регистрацией и однолинзовой системой освещения. Пространственное разрешение по пламени было не хуже 0,01 мм. Исследовалось ламинарное кинетическое пламя смеси пропан — бутан (воздух с коэффициентами избытка окислителя $\alpha = 0 \div 1,2$ на горелках круглого сечения диаметром от 5 до 10 мм и на горелке прямоугольного сечения 3×20 мм и плоское диффузионное пламя пропан-бутана на горелке Вольфгардта —

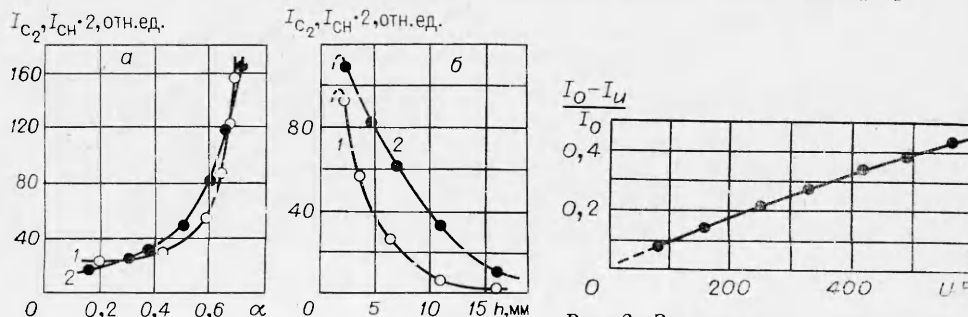


Рис. 1. Интенсивность излучения радикалов CH^* (1) и C_2^* (2) в кинетическом факеле пропан-бутан — воздух в зависимости от α ($h=6$ мм) (а) и от h ($\alpha=0,6$) (б).

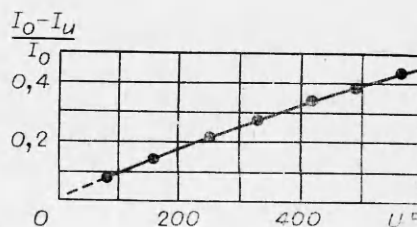


Рис. 2. Зависимость относительного изменения интенсивности излучения радикала C_2^* при включении электрического поля от разности потенциалов U между электродами. Горелка под отрицательным потенциалом.