

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Глазкова, Ю. А. Казарова, А. В. Суслов. *Archiwum termodynamiki i spalania*, 1978, 9, 4, 591.
2. А. П. Глазкова, Ю. А. Казарова. *Химическая физика*, 1982, 4, 553.
3. W. G. Parker, H. G. Wolfhard. *Fourth Symp. (Intern.) on Combust.* Baltimore, 1953.
4. B. D. Bond, P. W. M. Jacobs. *J. Chem. Soc. A*, 1966, 1265.
5. Е. А. Бордюшкова, П. И. Проценко, Л. И. Венеровская. *ЖПХ*, 1967, 7—8, 1438.
6. P. M. Oza, S. Patel. *J. Indian Chem. Soc.*, 1954, 31, 519.
7. П. И. Проценко, Е. А. Бордюшкова. *ЖНХ*, 1965, 10, 5—6, 1215.
8. Л. А. Алексеенко. *Тр. ТГУ. Вып. 126.* Томск, 1964.
9. А. Р. Glaskova, Ju. A. Kazarova, A. V. Saveljev. 6-th Symp. on Chemical Problems Connected with the Stability of Explosives. Sweden, May 1979.
10. А. П. Глазкова, И. А. Терешкин. *ЖФХ*, 1961, 35, 7, 1622.
11. А. П. Глазкова. Катализ горения взрывчатых веществ. М.: Наука, 1976.
12. А. А. Шидловский, А. С. Попович, Л. Ф. Шмагин и др. *ЖПХ*, 1970, XLIII, 434.
13. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.: Оборонгиз, 1957.
14. M. Berthelot. *Comptes Rendus Academie Sciences de Paris*, 1874, 78, 101.
15. J. Thomsen. *Thermochemische Untersuchungen. Bd 2.* Leipzig, 1882.
16. Pascal, Krieg, Declereck, Perier, Francois. *Memorial poudres.* 1953, 35, 335.

К ВОПРОСУ О ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВОВАНИЯ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОГАЗОВОЙ ГОРЕЛКЕ

Б. Г. Дьячков
(Москва)

Большинство практически важных задач, связанных с технологическим горением, которые могут быть решены с использованием электрогазовых горелок (получение высокотемпературных восстановительных газов или потока продуктов сгорания с максимально высокой температурой), требуют знания предельных условий существования диффузного электрического разряда в пламени, т. е. нижнего и верхнего температурного уровня факела, определяющих область диффузного разряда в нем.

Поставленный вопрос весьма актуален. Действительно, стремление получать на выходе из электрогазовой горелки высокое содержание газов-восстановителей вызывает необходимость максимального снижения коэффициента избытка воздуха α , а следовательно, и температуры газа, что в предельном случае предполагает работу горелки без подачи воздуха вообще, т. е. работу горелки «без горения». Очевидно, такие крайние условия могут быть обеспечены только дуговым разрядом, имеющим место в плазмотроне.

Далее, диффузный электрический разряд, вообще говоря, можно организовать не только в горящем факеле или в продуктах сгорания с введением в них легкоионизируемой присадки. Возможен газ любого состава, в том числе и воздух. Важно первоначально обеспечить газовому потоку такой температурный уровень, при котором присадка, термически ионизируясь, создает необходимую электрическую проводимость для формирования диффузного разряда.

Назовем предельно низкую температуру факела или газа любого другого состава, при которой находящаяся в нем присадка щелочного металла, термически ионизируясь, обеспечивает факелу минимальную проводимость для инициирования диффузного разряда, нижней критической температурой $T_{кр}^H$. При таком определении $T_{кр}^H$ разделяет области диффузного и дугового разрядов в факеле так, что снижение температуры факела ниже $T_{кр}^H$ преобразует электрогазовую горелку в плазмотрон.

Подобное явление происходит и на высоком температурном уровне (при больших разрядных токах), когда ставится задача максимально прогреть продукты сгорания в режиме диффузного электрического разряда. И в этом случае критическая ситуация наступает, когда температура «электроусиленного» факела достигает столь высокого значения, при котором вследствие термической ионизации легкоионизируемой присадки создается чрезвычайно высокая проводимость, локализуемая разряд, заставляющая его вырождаться из диффузного в дуговой. В этом случае, однако, удобнее границу перехода разряда из диффузной области в дуговую характеризовать не верхней критической температурой, а электрическим параметром — критическим значением удельной электрической мощности $W_{уд}^{HP}$, вносимой в разряд.

Установим $T_{кр}^H$ для продуктов сгорания природного газа. Зависимость проводимости такой газовой среды от температуры может быть представлена выражением [1]

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

где T — температура, К; $[K]$ — объемная концентрация калия, %; α — коэффициент избытка воздуха.

Для простоты примем, что природный газ сжигается в стехиометрическом соотношении с воздухом ($\alpha = 1$), а снижение температуры газа от теоретического значения обеспечивается соответствующим теплоотводом через стенку. В этом случае выражение (1) существенно упрощается.

Рассмотрим однофазный прямоточный вариант электрогазовой горелки, у которой сетчатые электроды (идеальный случай) располагаются поперек потока на расстоянии L друг от друга. Диаметр разрядной камеры составляет величину d ($L/d = k$). Диффузность разряда означает, что сопротивление разрядного промежутка может быть выражено соотношением $R = L/S\sigma$, а разность потенциалов между электродами (в ядре потока) — $u = i/R$. Отсюда

$$u = i \cdot 4L / \pi d^2 \sigma, \quad (2)$$

где S — сечение разрядной камеры; i — разрядный ток.

Известно также, что ударная ионизация нейтральных частиц электронами достигается при $E/p \geq 2$, где E — напряженность электрического поля между электродами (В/см), p — давление (мм рт. ст.). Выполнив условия $E/p = 2$ означает лавинообразное нарастание концентрации электронов и электрический пробой газовой промежутка, приводящий к образованию дуги. Условие пробоя можно записать иначе:

$$u = 2pL, \quad (3)$$

где L — междуэлектродный промежуток.

Таким образом, в критической ситуации

$$2pL = i \cdot 4L / \pi d^2 \sigma \text{ или } \sigma = i \cdot 2 / \pi d^2 p. \quad (4)$$

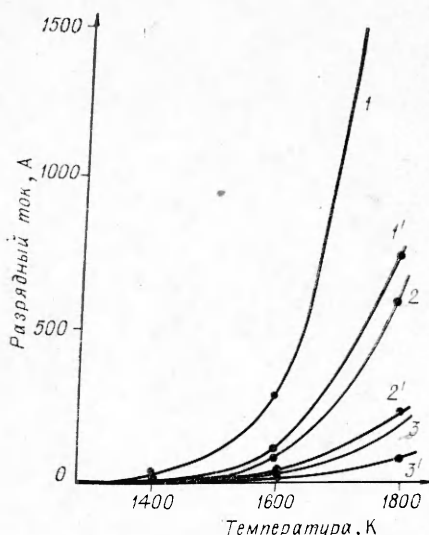
Приравнявая (1) и (4), имеем

$$8,25 \cdot 10^5 \exp\left(-\frac{27490}{T_{кр}^H}\right) [K]^{0,5} = i \frac{2}{\pi d^2 p}. \quad (5)$$

Для определения $T_{кр}^H$ по уравнению (5) примем во внимание, что при этой температуре термическая ионизация присадки щелочного металла весьма низка, а его концентрация в потоке газа не должна оказывать влияние на величину разрядного тока, который, в свою очередь, должен быть мал (при диффузном характере разряда).

Выберем три концентрации калия в потоке газа (0,1, 0,01 и 0,001%) и произвольные температуры газа (1800, 1600 и 1400 К) и по уравнению (5) определим соответствующие разрядные токи¹.

На рисунке представлена полученная зависимость $i = f(T)$ при $[K] = \text{var}$. Абсолютные значения разрядных токов в области температур 1600—1800 К, естественно, не отвечают реальным условиям, поскольку эти температуры заведомо не критические. Смысл графиков состоит в том, что они позволяют установить тенденцию изменения разрядного тока в области пониженных температур и определить $T_{\text{кр}}^{\text{H}}$, при которой разрядный ток практически равен нулю и перестает зависеть от концентрации щелочного металла. Графическое определение дает $T_{\text{кр}}^{\text{H}} \approx 1350$ К.



Зависимость разрядного тока в электрогазовой горелке от температуры газа. Концентрация калия, %: 1, 1' — 0,1, 2, 2' — 0,01, 3, 3' — 0,001; расход природного газа, м³/ч: 1—3 — 35, 1'—3' — 10.

Изложенное выше свидетельствует о том, что технически вполне реален перегрев газового потока диффузным электрическим разрядом с 1200—1400°С до более высоких температур. К примеру, не реконструируя доменные воздухонагреватели, можно перегревать воздушный поток на тракте воздухонагреватель — доменная печь до значительно более высоких температур, чем это в состоянии обеспечить существующие воздухонагреватели [2]. Как известно, увеличение температуры воздушного дутья способствует снижению расхода дорогостоящего кокса.

Для определения $W_{\text{уд}}^{\text{кр}}$ воспользуемся критерием Б. Карловица [3]

$$D = \frac{dn}{dT} \left(\frac{l}{u'} \right) \frac{c_{1\text{H}} \mu_e}{c_p \rho} E^2, \quad (6)$$

отвечающего граничным условиям перехода диффузного разряда в дуговой при $D = 1$ (с учетом того, что $\sigma = n_e e \mu_e$). В выражении (6) приняты следующие обозначения: n — концентрация электронов, см⁻³; T — температура газа, К; l — масштаб турбулентности, см; u' — интенсивность турбулентности, см/с; μ_e — подвижность электронов, см²/(В·с); c_p — теплоемкость газа, Дж/град; ρ — плотность газа, кг/см³; E — напряженность электрического поля, В/см.

Подвижность электронов в продуктах сгорания с присадкой щелочного металла по данным работы [4] слабо зависит от температуры в диапазоне 1600—3200 К. Так, в продуктах сгорания при парциальном давлении калия 0,04 атм $\mu_e = 0,3$ м²/(В·с), а при парциальном давлении 0,02 атм — $\mu_e = 0,4$ м²/(В·с). Учитывая это обстоятельство, преобразуем выражение (6)

$$D = \frac{d\sigma}{dT} \left(\frac{l}{u'} \right) \frac{E^2}{c_p \rho}.$$

При $D = 1$ имеем

$$E_{\text{кр}}^2 = \frac{c_p \rho}{\left(\frac{d\sigma}{dT} \right) \left(\frac{l}{u'} \right)}, \quad W_{\text{уд}}^{\text{кр}} = E_{\text{кр}}^2 \sigma.$$

¹ Геометрические размеры разрядного промежутка выбраны соответствующими электрогазовой горелке с номинальным расходом природного газа, равным 35 м³/ч, т. е. $d = 5,1$ см. Давление принято равным атмосферному.

Критическое значение удельной электрической мощности, реализуемой в разрядном промежутке горелки, определяется выражением (1). Примем также, что $c_p = 1,523 \cdot 10^{-10} \cdot T^{2,855}$ ккал/(кг · К) (обобщающее выражение для c_p получено в том же интервале температур 2200—3200 К, что и для σ , по табличным данным [5] и среднему значению $\rho = 0,1236$ кг/м³). В результате расчетов получено

$$W_{уд}^{кр} = \frac{0,788 \cdot 10^{-13} T^{2,855}}{l/u'} \text{ Вт/см}^3. \quad (7)$$

Для горелки с расходом природного газа 35 м³/ч ($d = 5,09$ см, $L = 12,72$ см, $v = 258,17$ см³ — объем разрядного промежутка) критическая мощность, реализуемая в разрядном промежутке, составит

$$W_{\Sigma}^{кр} = \frac{203,44 \cdot 10^{-16} T^{2,855}}{l/u'} \text{ кВт}. \quad (8)$$

Выберем несколько значений характеристических времен турбулентности, типичных для камерного сжигания природного газа: $l/u' = 10^{-6}$, 10^{-5} и 10^{-4} с. Значения $W_{\Sigma}^{кр}$, вычисленные по уравнению (8), приведены в таблице в зависимости от температуры T и l/u' . Данные таблицы не обеспечивают однозначности определения $W_{\Sigma}^{кр}$, необходимо дополнительное уравнение, связывающее W_{Σ} и T .

На основе машинного расчета получена зависимость теоретической температуры продуктов сгорания природного газа в воздухе (стехиометрическая смесь) от удельной электрической мощности q , приходящейся на 1 м³/ч продуктов сгорания при нормальных условиях:

$$q = 1,12 \cdot 10^{-3} T - 2,527 \text{ кВт/(м}^3\text{/ч)}. \quad (9)$$

Для электрогазовой горелки с номинальным расходом природного газа 35 м³/ч недостающее уравнение найдется в виде

$$W_{\Sigma} = 9,55 \cdot 35 \cdot 1,1 q = 367,675 (1,12 \cdot 10^{-3} T - 2,527) \text{ кВт или} \\ T = W_{\Sigma} / 0,412 + 2255 \text{ К}, \quad (10)$$

где 1,1 — коэффициент, определяемый отношением объемов влажных продуктов сгорания (при сжигании метана) и воздуха; W_{Σ} — произведение разрядного тока на разность потенциалов между электродами.

Совместное решение уравнений (8) и (10) для определения критической мощности получено графическим методом: $W_{\Sigma}^{кр} = 105$ кВт, что отвечает характеристическому времени турбулентности 10^{-6} с, которая реально получена в экспериментах. Найденное значение мощности соответствует удельному значению электрической критической мощности $W_{уд}^{кр} = 406,7$ Вт/см³ для горелки с номинальным расходом природного газа 35 м³/ч.

Таким образом, для расширения области существования диффузного электрического разряда «сверху» необходимо уменьшать характеристическое время турбулентности; реально это время, по-видимому, невозможно уменьшить ниже 10^{-6} с. Конечные результаты расчетов не изменяются при рассмотрении горелок иной производительности.

На основе изложенного можно сделать два важных вывода.

Во-первых, стыковка методики инженерного расчета статических вольт-амперных характеристик однофазных электрогазовых горелок и критерия Карловица, учитывающего временные параметры, приводит к хорошему совпадению критических мощностей, реализуемых в разряде (Карловиц отмечает границу перехода диффузного разряда в дуговой

$l/u', \text{ с}$	$W_{\Sigma}^{кр}$ при $T, \text{ К}$			
	400	2600	2800	3000
10^{-7}	909,8	1143,4	1412,8	1720,4
10^{-6}	91,0	114,3	141,3	172,0
$5 \cdot 10^{-6}$	18,2	22,9	28,3	34,4
10^{-5}	9,1	11,4	14,1	17,2
10^{-4}	0,9	1,1	1,4	1,7

при $W_{уд}^{кр} = 400 \div 500 \text{ Вт/см}^3$; расчетное значение, подтвержденное экспериментами для конкретного режима работы электрогазовой горелки, $W_{уд}^{кр} = 406,7 \text{ Вт/см}^3$). Это обстоятельство свидетельствует о том, что критерий Карловица в основном верно отражает существо происходящих в ядре потока явлений.

Во-вторых, если по данным работы [6] для условий камерного сжигания природного газа экспериментально полученное значение характеристического времени турбулентности составляет $\sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ (учитывая также предыдущий вывод), то электрический диффузный разряд ведет к значительному снижению этого времени, вплоть до 10^{-6} с при критическом вкладе в разряд электрической мощности. Иначе говоря, электрический разряд уменьшает масштаб турбулентных пульсаций при одно-временном увеличении их интенсивности.

С повышением мощности электрического разряда одновременно снижается и время формирования дугового разряда. Если при малых мощностях это время превышает $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, то в критической ситуации оно достигает равенства характеристическому времени турбулентных пульсаций ($\sim 10^{-6} \text{ с}$).

Поступила в редакцию 15/IV 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Г. Дьячков. Тез. докл. семинара по электрофизике горения. Караганда, 1979.
2. Б. Г. Дьячков, И. Я. Полонский, М. А. Салимов и др. Интенсификация факельных процессов электрическим разрядом. М.: Металлургия, 1976.
3. В. Karlovitz. Pure and Appl. Chem., 1962, 5. 3/4. 557.
4. Л. Форст. ВРГ, 1962, 7, 3.
5. А. В. Недоспасов, Л. П. Побережский, Ю. Г. Чернов. Состав и свойства рабочих тел МГД-генераторов открытого цикла. М.: Недра, 1977.
6. Г. Н. Абрамович, Г. Ю. Крашенинников, А. Н. Секундов и др. Турбулентное смешение газовых струй. М.: Наука, 1974.

«ХОЛОДНОЕ» ЗАПИРАНИЕ КАНАЛА ГАЗОЖИДКОСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ ГОРЯЩИМИ СТРУЯМИ ГОРЮЧЕГО

М. Е. Рудяк

(Ленинград)

Особенности взаимодействия в канале фронта пламени, который распространяется от стабилизатора, с обтекающим его потоком несгоревшей (холодной) топливной смеси описаны в [1, 2]. При определенном значении числа Маха (M) на входе сжимаемость несгоревшего топливного потока вызывает сокращение ширины пламени и уменьшение доли топлива, выгоревшего в канале. Холодный поток, отделенный от продуктов сгорания фронтом пламени, запирает (блокирует) течение. Блокирование объясняется наличием в каждом сечении канала, которое находится за стабилизатором, двух характерных чисел M : для продуктов сгорания и для холодного потока топлива.

Если тепловое запирание канала продолжает привлекать внимание в связи с исследованием эффективных способов сжигания горючего в сверхзвуковом потоке воздуха [3—5], то сведения о холодном блокировании ограничены упомянутыми выше работами.

Задача Тзына и Болла решена в одномерном приближении для плоского канала. Экспериментальные данные, с помощью которых можно было бы проверить результаты, в литературе отсутствуют. Значительный интерес представляют исследования подобного явления в круглом канале при раздельной подаче в него окислителя и горючего и диффузионном выгорании последнего. Этому вопросу и посвящена настоящая работа.