

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО СЕЧЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ
С НЕЙТРАЛЬНЫМИ АТОМАМИ
СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ**

Э. П. Зимин, В. А. Попов

(Москва)

В работе описаны эксперименты по определению среднего сечения столкновений электронов с нейтральными атомами при температурах 1900—2300° К. Сечения определяются по данным о затухании радиоволн в продуктах сгорания метано-кислородной смеси с добавками калия.

1. Как показано в работе [1, 2], при определенных условиях коэффициент затухания радиоволн в проводящем газе связан с электропроводностью этой среды следующим соотношением:

$$\sigma_0 = 5.54 \cdot 10^8 \left(1 + \frac{\omega^2}{\nu^2} \right) \frac{\gamma}{z} \quad (1)$$

Здесь σ_0 — электропроводность постоянному току (сек^{-1}); ω — круговая частота радиоизлучения; ν — эффективная частота столкновений электронов с тяжелыми частицами газа; γ — коэффициент затухания (∂b) и z — длина исследуемого объекта.

Из уравнения (1) следует, что, располагая экспериментальными значениями γ , можно вычислить значения электропроводности переменному току $\sigma_0(1 + \omega^2/\nu^2)$ и далее через известное ν определить величину σ_0 . К сожалению, величина ν при низких энергиях электронов, т. е. при температурах менее 5000° К, для большинства газов точно неизвестна. Знание ее представляет большой практический интерес.

Однако из уравнения (1) следует, что по замерам коэффициента затухания радиоволн на любых двух частотах можно определить как σ_0 , так и ν , при этом

$$\sigma_0 = \frac{n_e e^2}{m \nu} \quad (2)$$

Здесь n_e — концентрация электронов, m и e — масса и заряд электрона соответственно.

Далее, эффективную частоту столкновений электронов с тяжелыми частицами газа целесообразно определить следующим соотношением:

$$\nu = \nu n_1 \left(Q_1 + Q_2 \frac{n_2}{n_1} + Q_i \frac{n_e}{n_1} \right) \quad (3)$$

которое является следствием условия, что сопротивление газа можно представить как сумму сопротивлений слабоионизованного газа, в котором преобладают упругие столкновения электронов с нейтральными атомами, и сильно ионизованного газа, в котором преобладают кулоновские взаимодействия электронов с положительными ионами [3]. В уравнении: (3) ν — средняя тепловая скорость электронов; n_1 — концентрация атомов неионизирующейся компоненты смеси; n_2 — концентрация атомов ионизирующейся компоненты смеси; Q_1 и Q_2 — средние сечения столкновений электронов с атомами соответствующих компонент смеси и Q_i — кажущееся сечение столкновений электронов с ионами.

Выше предполагается, что: 1) смесь содержит нейтральные атомы только двух газов — практически неионизируемого разбавителя (n_1, Q_1) и легкоионизируемой добавки (n_2, Q_2); 2) концентрация добавки очень мала ($n_2 \ll n_1$); 3) имеет место только однократная ионизация и 4) степень ионизации добавки мала $n_e / n_2 \ll 1$.

Предполагая вид функции $Q_i(n_e)$ заданным, целесообразно экспериментальные замеры затухания радиоволн использовать для определения концентрации электронов и эффективного сечения столкновений электронов с нейтральными атомами смеси $Q_0 = Q_1 + Q_2 n_2 / n_1$.

Тогда задача сводится к решению системы двух алгебраических уравнений

$$\frac{e^2 \alpha}{m \nu (Q_0 + Q_i \alpha)} = \beta_j \left[1 + \frac{\omega_j^2}{\nu^2 n_1^2 (Q_0 + Q_i \alpha)^2} \right] \quad (j = 1, 2) \quad (4)$$

Здесь

$$\alpha = n_e / n_1, \quad \beta_j = 5.54 \cdot 10^8 \gamma_j / z$$

Следует отметить, что так как Q_0 является линейной функцией относительной концентрации добавки $\epsilon = n_2 / n_1$, то зная экспериментальную зависимость $Q_0(\epsilon)$

можно определить среднее сечение столкновений электронов с нейтральными атомами как разбавителя (Q_1), так и добавки (Q_2).

Решая систему (4), получаем ($\omega_1 > \omega_2$)

$$Q_0 = \frac{\alpha e^2}{2\beta_2 m v} + \left[\left(\frac{\alpha e^2}{2\beta_2 m v} \right)^2 - \frac{\omega_2^2}{v^2 n_1^2} \right]^{1/2} - \alpha Q_i \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{m \omega_2 \beta_2}{e^2 n_1} \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} - 1 \right) \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} - 1 \right)^{-1/2} \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} - \frac{\beta_2}{\beta_1} \right)^{-1/2} \quad (6)$$

или

$$Q_0 = \frac{1,87 \cdot 10^{20} \alpha}{\beta_2 \sqrt{T}} \left[1 + \left(1 - 1,16 \cdot 10^{-60} \frac{T^2 \omega_2^2 \beta_2^2}{p^2 \alpha^2} \right)^{1/2} \right] - \alpha Q_i$$

$$\alpha = 5,38 \cdot 10^{31} \frac{T \omega_2 \beta_2}{p} \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} - 1 \right) \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} - 1 \right)^{-1/2} \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} - \frac{\beta_2}{\beta_1} \right)^{-1/2}$$

Кажущееся сечение столкновений электронов с ионами определяется выражением (k — константа Больцмана)

$$Q_i = 8,1 b^2 \ln \Lambda, \quad b = \frac{e^2}{3kT}, \quad \Lambda = \frac{3}{2} \frac{k^2 T^2}{\sqrt{2\pi} e^3 \sqrt{p\alpha}} \quad (7)$$

Для упрощения вычислений выражение (7) удобно преобразовать к виду

$$Q_i = \frac{2,9 \cdot 10^{-6}}{T^2} (4 \lg T - \lg p - \lg \alpha - 14)$$

2. Если $n_2 \ll n_1$ и Q_2 незначительно отличается от Q_1 , то определяющим параметром будет сечение столкновений Q_1 , которое можно определить более простым графическим методом [4]. Подставляя константы в уравнения (1) и (2), получим

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{a} \frac{\omega^2}{v} + \frac{v}{a} \quad (a = n_e / 2,16) \quad (8)$$

Очевидно, что зависимость, построенная в системе координат (γ^{-1} , ω^2), носит линейный характер и позволяет определить из угла наклона прямой линии к оси $0\omega^2$ и ординаты (γ^{-1}) $_{\omega=0}$ как n_e , так и v .

Разумеется, что этот метод не может быть использован для определения средних сечений столкновений электрона с нейтральными атомами как разбавителя (Q_1), так и добавки (Q_2).

3. Исследования проводились на продуктах сгорания метано-воздушных и метано-кислородных смесей. Смесью сжигалась на горелке факельного типа с образованием достаточно однородной области продуктов сгорания. Температура варьировалась путем изменения состава смеси. Давление равнялось 1 атм. Легкоионизируемая добавка вводилась в поток окислителя непосредственно перед камерой предварительного смешения горелки в виде водного раствора K_2CO_3 различной концентрации. Температура продуктов сгорания измерялась методом обращения линий Na. Метод использования волноводных линий $\omega_1 = 10\,000$ Мгц и $\omega_2 = 40\,000$ Мгц аналогичен описанному в работах [1, 2].

Эксперименты проводились при трех различных значениях концентрации раствора K_2CO_3 , вводимого в факел, отличающихся в 10^2 раз.

Здесь приведены результаты, полученные при различных температурах; погрешность не превышает 3–5%.

Поступила 1 IV 1963

ЛИТЕРАТУРА •

1. Зими́н Э. П., Попов В. А. Исследование электропроводности пламени микроволновым методом. Инж. физ. ж., 1962, т. V, № 3.
2. Зими́н Э. П., Попов В. А. Research on the electrical conductivity of combustion products with potassium seeding. Proc. of Symposium on magnetoplasmadynamic electrical power generation. Newcastle, 1962.
3. Lin S. C., Resler E. L., Kantrowitz A. Electrical conductivity of highly ionized argon produced by shock waves. J. Appl. Phys., 1955, v. 26, p. 95.
4. Belcher H., Sugden T. M. Studies on the ionization produced by metallic salts in flames. Proc. Roy. Soc. A, 1950, 201, 480.