

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ НА СТЕПЕНЬ ИОНИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ

С. Н. Баршутин, Э. А. Мешкова

*Кафедра «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; asp@yandex.ru*

Ключевые слова: ионизация пламени; термоэлектронная эмиссия; углеродные частицы.

Аннотация: Исследованы ионизационные процессы в пламени. В частности, рассмотрено влияние термоэлектронной эмиссии электронов из твердой фазы углерода и возможные физико-математические модели, описывающие данный процесс. Разработана модель ионизации пламени, и проведена оценка вклада термоэмиссионных электронов в общую степень ионизации пламени.

В электрофизическом плане основной параметр пламени – его степень ионизации. Основным соотношением, описывающим ионизационное состояние продуктов сгорания, является формула Саха, по которой возможно определить концентрацию электронов в случае, если система находится в условиях термодинамического равновесия [1].

Однако в большинстве углеводородных факелов концентрация ионизированных частиц не поддается описанию формулой Саха. Концентрация электронов в реальных экспериментах оказалась намного больше. Исследования, проведенные рядом авторов, обобщены в [1] и показывают, что большую роль в разнице степени ионизации теоретической, посчитанной по формуле Саха, и экспериментальной играет ионизация конденсированных частиц. В частности, образуемые частицы углерода в пламени имеют работу выхода 4 эВ, что позволяет эффективно снабжать пламя электронами, повышая при этом степень ионизации. В рассмотренных работах предложено соотношение, позволяющее определить концентрацию электронов в пламени [1]:

$$n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_q - k_B T}{h^2} \right)^{1,5} \exp\left(-\frac{\varphi_0}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{n_{en}}{n_p} \frac{z_e^2}{rk_B T}\right), \quad (1)$$

где m_q – масса частицы; k_B – постоянная Больцмана; T – температура частиц; h – постоянная Планка; φ_0 – работа выхода электрона из конденсированной фазы; n_{en} – начальная концентрация электронов; n_p – концентрация конденсированных частиц; r – радиус частиц; z_e – заряд электрона.

Проведем подробный анализ соотношения (1), учитывающего эмиссию электронов из конденсированной фазы, который позволил выделить три множителя, оказывающих влияние на концентрацию.

Подстановка значений в первый множитель $\left((2\pi m_q - k_B T)/h^2\right)^{1,5}$ при любых величинах реальной температуры переводит его в поле комплексных чисел. Поэтому использование уравнения (1) в исходном виде не представляется возможным. Анализ размерности данного множителя показал отсутствие физическо-

го смысла в действиях с физическими величинами, входящими в его состав. Невозможно из массы вычесть энергию. Так как остальные множители являются экспонентой, то представленный для анализа множитель должен иметь размерность концентрации n_e , например см^{-3} , моль $^{-1}$ и т.д. Если даже представить массу через энергию, и верхнюю часть привести к размерности Дж, то нижняя часть, квадрат постоянной Планка, имеет размерность $\text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2$. В итоге множитель будет иметь размерность $\text{Дж}^{-1.5} \cdot \text{с}^{-3}$, что еще раз доказывает невозможность применения формулы (1) в том виде, в котором она приведена в работе [1].

Представим, что данная формула выведена эмпирически, и основная изменяющаяся физическая величина – температура. Тогда для получения реальных значений множителя необходимо, чтобы масса m_q при $T = 1600$ К соответствовала следующему неравенству

$$m_q > \frac{k_B T}{2\pi} = 3,517 \cdot 10^{-21} \text{ кг.}$$

Определим минимальное число атомов, которое должна содержать конденсированная частица, чтобы значение концентрации имело реальную величину и не находилось в области комплексных чисел.

Масса одного атома углерода $1,9926 \cdot 10^{-23}$ г. Тогда при делении массы конденсированной частицы на массу углерода получим число атомов углерода, равное $1,7644 \cdot 10^5$ шт. При оценке размера данной частицы величина оказывается в пределе 13 нм.

Предполагая повышение ионизации пламени за счет термоэлектронной эмиссии в уравнении не учтено, что для термоэлектронной эмиссии электронов из сажевых частиц необходима энергия порядка 4 эВ. Однако такой энергии в пламени без наложения электрического поля можно достичь только при температуре выше 40 000 К, что в реальном пламени с температурой максимум 2500 К практически невозможно. Единственной возможностью сообщить электрону необходимую энергию является формирование электрического поля с соответствующей напряженностью.

Так как уравнение (1) вызывает много вопросов, проведем оценку влияния термоэлектронной эмиссии на концентрацию электронов в пламени исходя из основного уравнения термоэлектронной эмиссии – формулы Ричардсона

$$j = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\phi}{k_B T}\right), \quad (2)$$

где ϕ – работа выхода; $A_0 = \frac{4\pi m_e k_B^2 z_e}{h^3} = 120 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}^2)$.

С другой стороны, плотность тока определяется по соотношению

$$j = I/S, \quad (3)$$

где I – электрический ток; S – площадь объекта термоэлектронной эмиссии.

Ток определим как

$$I = z_e n_e / t, \quad (4)$$

где n_e – концентрация электронов, образованная за счет термоэлектронной эмиссии; t – интервал времени.

Площадь объекта найдем из следующих приближений. Представим, что объект термоэлектронной эмиссии имеет шарообразную форму, тогда площадь определяется по формуле

$$S = \pi d^2 n_p, \quad (5)$$

где d – диаметр частицы.

Объединим выражения (2) – (5) и выразим концентрацию электронов

$$n_e = \frac{t\pi d^2 n_p A_0 T^2}{z_e} \exp\left(-\frac{\phi}{k_B T}\right). \quad (6)$$

Данная формула позволяет определить число вышедших электронов из конденсированной фазы за счет термоэлектронной эмиссии за период времени t для одного моля исследуемого объема.

Однако, при нормальном атмосферном давлении время жизни электрона в свободном состоянии определяется условием рекомбинации либо на нейтральной компоненте с появлением отрицательно заряженного иона, либо на положительном ионе. Время, проведенное до столкновения, и является временем жизни. Для его оценки необходимо определить частоту столкновений заряженных частиц с нейтральной компонентой пламени.

При отсутствии внешнего воздействия электрического поля или его незначительном значении частоту столкновения v_{en} возможно определить по следующему соотношению [2]:

$$v_{en} = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} \int v_{en}(v) w^4 \exp(-w^2) dw; \quad (7)$$

$$v_{en}(v) = \sum_j n_j v \int \sigma_{ej}(v, \chi) (1 - \cos \chi) 2\pi \sin(\chi) d\chi; \quad (8)$$

$$w = v / \sqrt{\frac{2k_B T}{m_q}}, \quad (9)$$

где v – скорость электрона; $\sigma_{ej}(v, \chi)$ – дифференциальное сечение рассеяния электронов на нейтральной компоненте j ; χ – угол рассеяния.

Преобразуя эффективное сечение рассеяния, представленное в [3], получим выражение для дифференциального сечения рассеивания электронов на j -й компоненте

$$d\sigma_{ej}(v, \chi) = \frac{z_e^4 \pi \sin(\chi)}{2m_q^2 v^4 \left(\sin\left(\frac{\chi}{2}\right)\right)^4} d\chi. \quad (10)$$

Решением интеграла в формуле (8) получим значение частоты столкновений v_{en} в зависимости от угла и скорости частицы

$$v_{en}(v) = \sum_j (n_j Z_j) \frac{2z_e^4 \pi}{m_q v} \log\left(\sin\left(\frac{\chi}{2}\right)\right) + C_1, \quad (11)$$

где C_1 – константа, образованная после интегрирования.

Дальнейшее решение уравнения (7) преобразует его к виду

$$v_{en} = \frac{\exp(-w^2)}{3\sqrt{\pi}} \left(3\sqrt{\pi} C_1 \exp(w^2) \operatorname{erf}(w) - 8 \sum_j (n_j Z_j) \frac{z_e^4 \pi}{m_q} \times \right. \\ \left. \times \log\left(\sin\left(\frac{\chi}{2}\right)\right) (w^2 + 1) - 2C_1 w (2w^2 + 3) \right) + C_2, \quad (12)$$

где C_2 – вторая константа, образованная после интегрирования; функция ошибок $\text{erf}(w)$ определяется по формуле

$$\text{erf}(w) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w \exp(-t^2) dt. \quad (13)$$

В равновесном состоянии, когда распределение электронов соответствует максвелловскому распределению, кинетическая энергия электронов определяется по соотношению

$$E_k = \frac{sk_B T}{2}, \quad (14)$$

где s – число степеней свободы частицы.

Кинетическая энергия может определяться по классической формуле

$$E_k = \frac{m v^2}{2}. \quad (15)$$

Объединив уравнения (14) и (15), скорость электрона может быть определена по следующему выражению

$$v = \sqrt{\frac{sk_B T}{m}}, \quad (16)$$

где s – число степеней свободы (для электрона $s = 2$).

Формула (16) согласуется с данными [4]

$$v = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}. \quad (17)$$

Таким образом, формула (17) позволяет определить среднюю скорость частиц в газе с температурой T и массой m . По частоте столкновения определим время жизни электрона

$$t = \frac{n_e}{v_{en}}. \quad (18)$$

Концентрация электронов, образованных за счет термоэлектронной эмиссии, будет определяться по следующему соотношению

$$n_e = \frac{n_{es} \pi d^2 n_p A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{k_B T}\right)}{v_{en} z_e - \pi d^2 n_p A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{k_B T}\right)}. \quad (19)$$

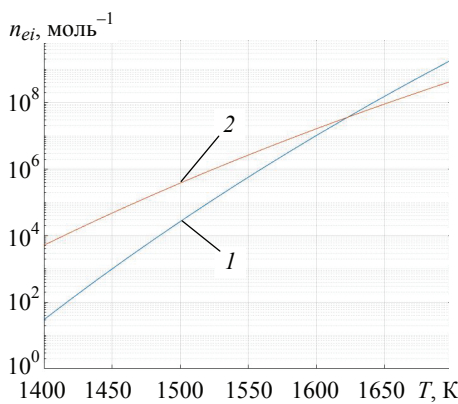


Рис. 1. Зависимость концентрации свободных электронов, образованных за счет:

1 – термоэлектронной эмиссии;
2 – по уравнению Саха

Полученное соотношение позволяет оценить вклад термоэлектронной эмиссии из углеродных частиц с меньшими значениями.

Сравним вклад в концентрацию электронов за счет повышения температуры по уравнению Саха [1] и за счет термоэлектронной эмиссии (рис. 1). Диапазон температур выберем более близкий к температуре сгорания бензина в среде воздуха.

Из графиков (см. рис. 1) видно, что вклад в ионизацию за счет термоэлектронной эмиссии до 1620 К меньше,

чем за счет термической ионизации, но уже при температуре 1700 К динамика формирования свободных электронов увеличивается, и концентрация, получаемая за счет термоэлектронной эмиссии, почти в 4,4 раза больше, чем при простой термической ионизации, описываемой уравнением Саха.

Список литературы

1. Кукин, П. П. Теория горения и взрыва : учеб. пособие для вузов / П. П. Кукин, В. В. Юшин, С. Г. Емельянов. – М. : Юрайт, 2013. – 435 с.
2. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Кн. 1 : вводный том / под ред. В. Е. Фортова. – М. : Наука, 2000. – 585 с.
3. Фейнман, Р. Квантовая механика и интегралы по траекториям / Р. Фейнман, А. Хибс ; пер. с англ. Э. М. Барлита и Ю. Л. Обухова ; под ред. В. С. Барашенкова. – М. : Мир, 1968. – 382 с.
4. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – 3-е изд., испр. и доп. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 736 с.
5. Баршутина, М. Н. Исследование электрических свойств полимерных диэлектрических матриц с наноструктурными объектами / М. Н. Баршутина, С. Н. Баршутин, А. В. Ушаков // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № С (52). – С. 16 – 19.
6. Чернышова, Т. И. Информационно-аналитическая система оценки и прогнозирования метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – № С (52). – С. 111 – 114.

Investigation of the Effect of Thermionic Emission of Electrons on the Degree of Flame Ionization

S. N. Barshutin, E. A. Meshkova

*Department of Power Supply of Enterprises and Heat Engineering,
TSTU, Tambov, Russia; aspir@yandex.ru*

Keywords: flame ionization; thermionic emission; carbon particles.

Abstract: Ionization processes in a flame are investigated. In particular, the influence of the thermionic emission of electrons from the solid carbon phase and possible physical and mathematical models describing this process are considered. A model of flame ionization was developed; the contribution of thermionic electrons to the total degree of flame ionization was evaluated.

References

1. Kukin P.P., Yushin V.V., Yemel'yanov S.G. *Teoriya goreniya i vzryva: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Theory of Combustion and Explosion: studies. manual for universities], Moscow: Yurayt, 2013, 435 p. (In Russ.)
2. Fortov V.Ye. [Ed.] *Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plazmy. Kn. 1: vvodnyy tom* [Encyclopedia of low-temperature plasma. Prince 1: introductory volume], Moscow: Nauka, 2000, 585 p. (In Russ.)
3. Feynman R., Khibs A., Barashenkov V.S. [Ed.] *Kvantovaya mekhanika i integraly po trayektoriyam* [Quantum mechanics and path integrals], Moscow: Mir, 1968, 382 p. (In Russ.)

4. Rayzer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of the gas discharge], Dolgoprudny: Intellekt, 2009, 736 p. (In Russ.)

5. Barshutina M.N., Barshutin S.N., Ushakov A.V. [Investigation of the electrical properties of polymeric dielectric arrays with nanostructured objects], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. S (52), pp. 16-19. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A. [Information and analytical system for assessing and predicting the metrological reliability of electronic measuring instruments], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, no. S (52), pp. 111-114. (In Russ., abstract in Eng.)

Die Wirkung der thermoelektrischen Emission von Elektronen aus Kohlenstoffpartikeln auf den Grad der Ionisierung der Flamme

Zusammenfassung: Es sind die Ionisationsprozesse in einer Flamme untersucht. Insbesondere sind die Wirkung der thermoelektrischen Emission von Elektronen aus der festen Phase des Kohlenstoffs und mögliche physikalische und mathematische Modelle, die diesen Prozess beschreiben, betrachtet. Ein Modell der Flammenionisation ist entwickelt und der Beitrag der Thermoemissionselektronen zum Gesamtgrad der Flammenionisation ist bewertet worden.

Influence de l'émission thermoélectronique des particules de carbone sur le degré de l'ionisation de la flamme

Résumé: Sont étudiés les processus d'ionisation dans les flammes. En particulier, est examiné l'effet de l'émission thermoélectronique d'électrons à partir de la phase solide du carbone et des modèles physicomatématiques possibles décrivant ce processus. Est élaboré un modèle d'ionisation des flammes; est effectué l'évaluation de la contribution des électrons de thermoémission au degré général d'ionisation des flammes.

Авторы: *Баршутин Сергей Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и теплотехника»; *Мешкова Эльвира Алексеевна* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.