

Бутаковские чтения : сборник статей II Всероссийской с международным участием молодёжной конференции / под ред. А.С. Заворина ; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2022.-С.307-310

УДК 537.568

Д.С. Баршутина, С.Н. Баршутин
Тамбовский государственный технический университет
Тамбов, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИИ МОЛЕКУЛ АЗОТА В ПЛАМЕНИ

Аннотация. Рассмотрены вопросы ионизации компонентов пламени, на основе распределения Максвелла разработано уравнение, которое устанавливает связь между количеством молекул, обладающих достаточной энергией для процесса ионизации и температурой пламени. Определена температура, при которой азот не подвергается ионизации.

D.S. Barshutina, S.N. Barshutin
Tambov State Technical University
Tambov, Russia

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF THERMAL IONIZATION OF NITROGEN MOLECULES IN A FLAME.

Abstract. The issues of ionization of flame components are considered, an equation is developed based on the Maxwell distribution, which establishes a relationship between the number of molecules with sufficient energy for the ionization process and the flame temperature. The temperature at which nitrogen does not undergo ionization is determined.

Традиционное топливо является на данный момент основным источником для производства тепловой и электрической энергии. Соответственно поиск путей повышения эффективности преобразования потенциальной энергии топлива в тепловую или электрическую является актуальной задачей.

Одним из способов повышения эффективности преобразования энергии является увеличение количества ионизированных состояний газообразных компонентов пламени.

Рассмотрим процесс горения топлива в газообразной фазе. Основными процессами ионизации в пламени являются: термическая ионизация, которая описывается уравнением Саха и химиоионизация, определяемая процессом химической реакции, при которой высвобождаемая энергия приводит к ионизации компонента пламени. Так как на процессы химиоионизации повлиять в заданной системе не представляется возможным, ввиду их зависимости только от компонентного состава, то для повышения степени ионизации подробно рассмотрим термическую ионизацию.

Основным механизмом в термической ионизации выступает ударная ионизация, которая за счет кинетической энергии соударяющихся молекул переводят связанный электрон молекулы в свободное состояние, образуя при этом положительный ион.

В равновесном состоянии распределение энергии молекул подчиняется распределению Максвелла [1]:

$$f(v) = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T} \right) \cdot v^2, \quad (1)$$

где m - масса молекулы, k - постоянная Больцмана, T - температура, v - скорость молекулы.

Функция распределения (1) по скоростям движения молекул азота при температуре 1500К представлена на рис.1.

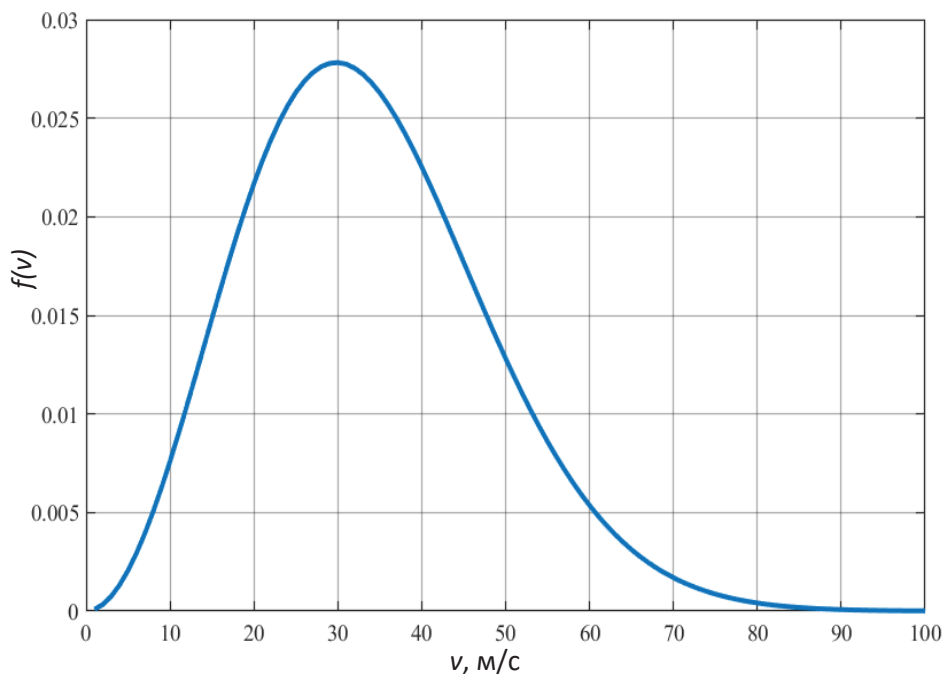


Рис.1 - График функции распределения скорости молекул.

Для определения количества молекул с кинетической энергией достаточной для ионизации, формулу (1) представим в виде $f(E)$:

$$f(E) = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m}{\pi \cdot k^3 \cdot T^3}} \cdot E \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right), \quad (2)$$

Тогда график распределения энергии будет иметь вид рис.2.

Для определения количества молекул, обладающих кинетической энергией выше энергии ионизации, воспользуемся следующим соотношением:

$$\frac{dn(E)}{n_0} = f(E) dE, \quad (3)$$

где n_0 – общее количество молекул в заданном объеме.

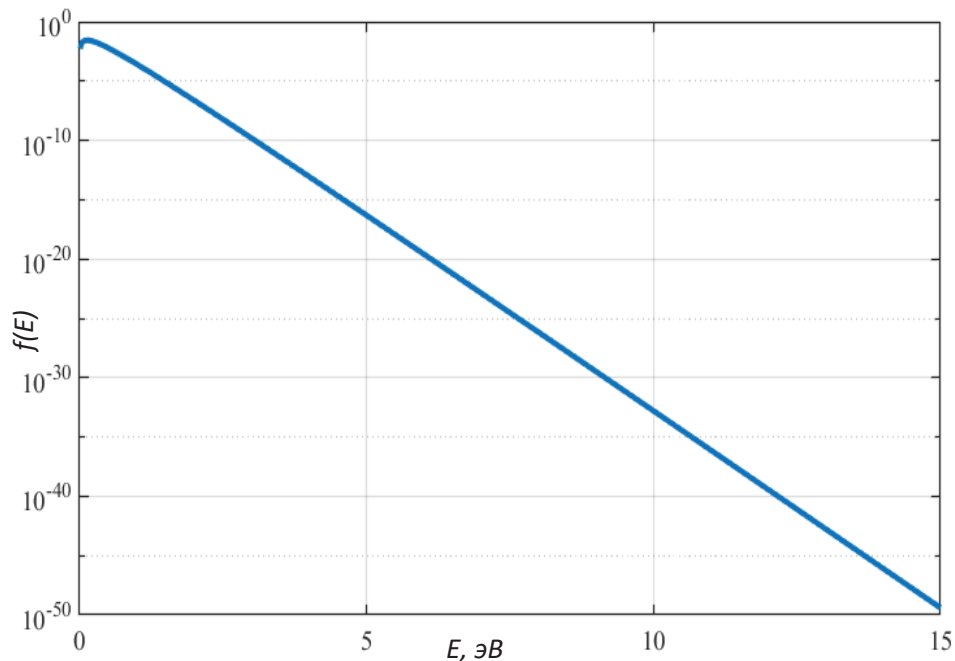


Рис.2 -График функции распределения кинетической энергии молекул

Проведем интегрирование:

$$n = n_0 \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m}{\pi \cdot k^3 \cdot T^3}} \cdot \int_{E_a}^{E_b} E \cdot \exp\left(-\frac{E}{k \cdot T}\right) dE, \quad (4)$$

где E_a, E_b – минимальное и максимальное значение энергии.

Нормируем полученную функцию таким образом, чтобы при интегрировании от 0 до ∞ получалось равенство $n=n_0$.

$$n = n_0 \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m}{\pi \cdot k \cdot T}} \cdot \left((E_a + k \cdot T) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) - (E_b + k \cdot T) \cdot \exp\left(-\frac{E_b}{k \cdot T}\right) \right), \quad (5)$$

Соответственно при $E_a=0$ и $E_b=\infty$ из уравнения (6) находим поправочный коэффициент p_k

$$p_k \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m}{\pi \cdot k \cdot T}} \cdot \left((0 + k \cdot T) \cdot \exp\left(-\frac{0}{k \cdot T}\right) - (\infty + k \cdot T) \cdot \exp\left(-\frac{\infty}{k \cdot T}\right) \right) = 1, \quad (6)$$

так как

$$\left((0 + k \cdot T) \cdot \exp\left(-\frac{0}{k \cdot T}\right) - (\infty + k \cdot T) \cdot \exp\left(-\frac{\infty}{k \cdot T}\right) \right) = k \cdot T, \quad (7)$$

то

$$p_k = \sqrt{\frac{\pi}{8 \cdot m \cdot k \cdot T}}, \quad (8)$$

В итоге уравнение (5) приобретет вид:

$$n = \frac{n_0}{k \cdot T} \cdot \left((E_a + k \cdot T) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) - (E_b + k \cdot T) \cdot \exp\left(-\frac{E_b}{k \cdot T}\right) \right), \quad (9)$$

Анализ функции зависимости количества молекул с энергий, которая превышает энергию ионизации азота от температуры показал, что процесс ионизации для молекул азота начинается с температуры 2866 К и выше рис.3.

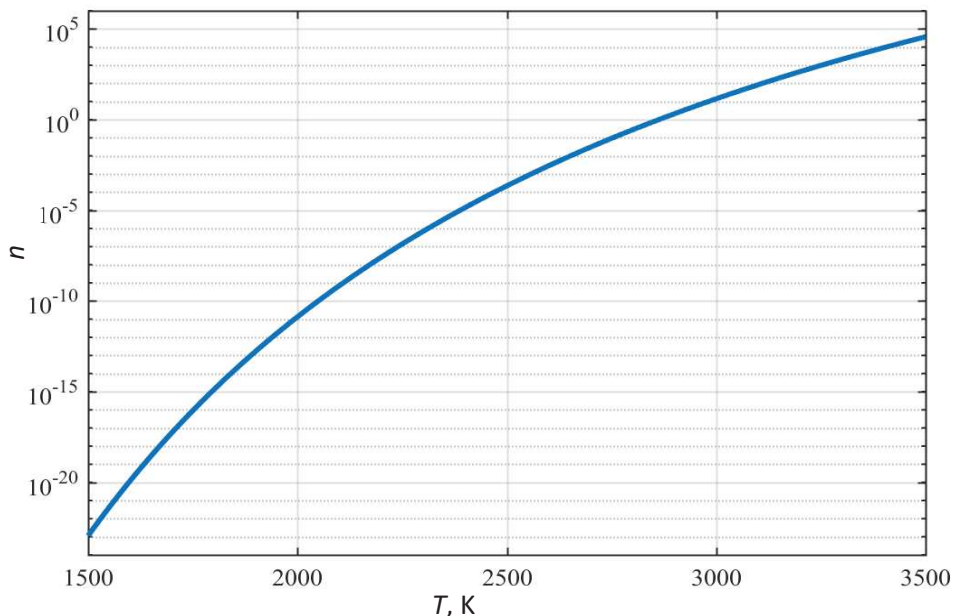


Рис.3 - График зависимости количества молекул пламени, обладающих энергией достаточной для ионизации молекул азота, от температуры

А так как, температура горения углеводородов в среде воздуха не превышает 2800 К, то ионизация молекул азота при горении углеводородов в среде воздуха происходить не будет.

Список использованных источников

1. Савельев И.В. Курс физики: учебное пособие для вузов: в 3 томах/ И.В. Савельев.-10-е изд., стер.- Санкт-Петербург: Лань, 2023.- Том1: Механика.Молекулярная физика.-356с.