

Кислякова Елена Васильевна

### **ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ КОРОНЫ В КИСЛОРОДЕ**

Исследовалась зависимость параметров модели импульсного коронного разряда в кислороде от локальной напряженности электрического поля. На основе экспериментальных данных путем аппроксимации получены функциональные зависимости для подвижности и коэффициентов диффузии электронов и ионов, коэффициента ударной ионизации. Доказано, что коэффициент прилипания с достаточной степенью точности можно считать постоянной величиной, не зависящей от локальной напряженности электрического поля в коронном разряде.

Адрес статьи: [www.gramota.net/materials/1/2013/9/22.html](http://www.gramota.net/materials/1/2013/9/22.html)

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

### **Альманах современной науки и образования**

Тамбов: Грамота, 2013. № 9 (76). С. 75-78. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: [www.gramota.net/editions/1.html](http://www.gramota.net/editions/1.html)

Содержание данного номера журнала: [www.gramota.net/materials/1/2013/9/](http://www.gramota.net/materials/1/2013/9/)

### **© Издательство "Грамота"**

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: [www.gramota.net](http://www.gramota.net)

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: [almanac@gramota.net](mailto:almanac@gramota.net)

Итак, все запросы-вызовы современности идут из многообразных источников, действуют во взаимной связи и обусловленности, нуждаются в новом качестве университетского образования. Этому качеству соответствует такой тип выпускника, который не просто имеет современные профессиональные знания в своей сфере деятельности, но и знаком с информационно-коммуникационными технологиями, знает иностранные языки, владеет основами экономики, управления, юриспруденции, психологически готов работать в условиях рыночного хозяйства и открытой экономики.

Таким образом, мы видим необходимость в становлении нового адаптационного типа воспроизводства кадров. Под адаптационным типом воспроизводства кадров с высшим профессиональным образованием мы понимаем следующее: вызовы-запросы современного мира, обращенные к человеку и высшей школе; модель адаптационного человека с высшим профессиональным образованием; проблему формирования трех потенциалов лиц с высшим профессиональным образованием – компетентностного, личностного, адаптационного; систему инновационных технологий и подготовленных кадров, обеспечивающую новый тип университетского образования, в частности, подготовку современного инженера.

#### Список литературы

1. **Байденко В. И.** Выявление состава компетенций выпускников вузов как необходимый этап проектирования ГОС ВПО нового поколения: методическое пособие. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2006. 72 с.
2. **Дежина И. Г.** Государственное регулирование науки в России. М.: Магистр, 2008. 430 с.
3. **Денисова Г. С.** Этносоциология: учебное пособие для студентов ун-тов и пед. вузов. Ростов-н/Д: ЦВВР, 2000. 280 с.
4. **Клюзина С. В., Лукашова Т. А., Белова Т. В.** Социально-экономические факторы развития региона // Экономика образования. 2009. № 3. Ч. 2. С. 263-267.
5. **Корчагин Ю. А.** Современная экономика России. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 544 с.
6. **Лысков А. П.** Человек: путь к цивилизации. Философский аспект социальной и культурной антропологии: монография. М.: Изд-во «Гуманитарий» Академии гуманитарных исследований, 1997. 120 с.
7. **Макашева Н. А.** Экономическая наука в эпоху трансформации (историко-методологический аспект) // Общественные науки и современность. 2000. № 5. С. 20-32.
8. **Рыбаков Ф.** Промышленность Санкт-Петербурга и вызовы неоиндустриальной экономики // Экономист. 2010. № 1. С. 39-42.

УДК 533.9

#### Физико-математические науки

*Исследовалась зависимость параметров модели импульсного коронного разряда в кислороде от локальной напряженности электрического поля. На основе экспериментальных данных путем аппроксимации получены функциональные зависимости для подвижности и коэффициентов диффузии электронов и ионов, коэффициента ударной ионизации. Доказано, что коэффициент прилипания с достаточной степенью точности можно считать постоянной величиной, не зависящей от локальной напряженности электрического поля в коронном разряде.*

*Ключевые слова и фразы:* коронный разряд; импульсы Тричеля; подвижность электронов; коэффициент ударной ионизации; коэффициент прилипания; коэффициент диффузии.

**Кислякова Елена Васильевна**, к. пед. н.  
Смоленский государственный университет  
elena151082@mail.ru

#### ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ КОРОНЫ В КИСЛОРОДЕ<sup>©</sup>

**1. Введение.** Различные типы частичных разрядов описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями. Система уравнений, моделирующая импульсный коронный разряд, протекающий вблизи отрицательного активного электрода в электроотрицательном газе, была предложена Р. Морроу [1]. В модели Морроу определяется концентрация электронов и ионов в газоразрядном промежутке в зависимости от координат точки и момента времени.

Решение такой системы дифференциальных уравнений представляет собой довольно сложную математическую задачу, так как в общем случае параметры модели (коэффициенты ионизации  $\alpha$ , прилипания  $\eta$ , рекомбинации  $\beta$ , диффузии  $D$ , подвижность заряженных частиц  $b$ ) не являются постоянными величинами, а зависят от времени и локальной напряженности поля ( $E/P$  или  $E/N$ ). Обычно при решении системы уравнений некоторыми из этих зависимостей пренебрегают и считают соответствующие коэффициенты

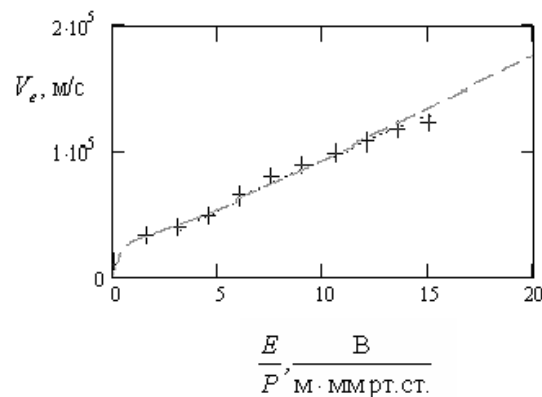
постоянными величинами. Так, в решении системы уравнений для отрицательной короны в воздухе, предложенном П. Саттари и К. Адамиаком [6], подвижности электронов и ионов, коэффициенты диффузии, прилипания и рекомбинации приняты постоянными величинами. В численной модели Б. А. Козлова и В. И. Соловьева [3] подвижности электронов и ионов также приняты постоянными величинами, а для коэффициента прилипания использовалась линейная аппроксимация. Между тем, интерес представляет исследование зависимостей коэффициентов от локальной напряженности поля (и тем самым от координат точки). Проведение аппроксимации экспериментальных данных для кислорода позволило автору в данном исследовании получить непрерывные и дифференцируемые функциональные зависимости для параметров модели отрицательной короны в кислороде.

**2. Физико-математическая модель отрицательной импульсной короны в кислороде.** Система уравнений Р. Морроу для численного моделирования отрицательной короны в электроотрицательном газе имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_e}{\partial t} &= N_e \cdot \alpha \cdot V_e - N_e \cdot \eta \cdot V_e - N_e \cdot N_p \cdot \beta_1 - \nabla \cdot (\vec{V}_e \cdot N_e) + \nabla^2 (D_e N_e); \\ \frac{\partial N_p}{\partial t} &= N_e \cdot \alpha \cdot V_e - N_e \cdot N_p \cdot \beta_1 - N_n \cdot N_p \cdot \beta_2 - \nabla \cdot (\vec{V}_p \cdot N_p) + \nabla^2 (D_p N_p); \\ \frac{\partial N_n}{\partial t} &= N_e \cdot \eta \cdot V_e - N_n \cdot N_p \cdot \beta_2 - \nabla \cdot (V_n \cdot N_n) + \nabla^2 (D_n N_n).\end{aligned}$$

В представленной системе уравнений:  $N_e$ ,  $N_p$  и  $N_n$  – концентрации электронов, положительных и отрицательных ионов;  $V_e$ ,  $V_p$  и  $V_n$  – скорости движения электронов, положительных и отрицательных ионов;  $\alpha$  – коэффициент ударной ионизации;  $\eta$  – коэффициент прилипания;  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – коэффициенты электронно-ионной и ион-ионной рекомбинации;  $D_e$ ,  $D_p$  и  $D_n$  – коэффициенты диффузии электронов, положительных и отрицательных ионов. Из системы уравнений видно, что предложенная Р. Морроу модель отражает только физические процессы, но не учитывает долговременные химические процессы, протекающие в газоразрядном промежутке.

**3. Аппроксимация зависимостей параметров модели от локальной напряженности поля.** Все вычисления проводились для кислорода при нормальных условиях  $T = 293 \text{ К}$ ,  $P = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , для аппроксимации использовался математический пакет *MathCad*.



**Рис. 1.** Зависимость  $V_e = f(E/P)$ : + – экспериментальные точки, --- – экспериментальная кривая, --- – результат аппроксимации

**3.1. Скорости частиц.** Скорости частиц могут быть определены через их подвижности  $b$ :  $V = b \cdot E$ , поэтому интерес представляет исследование зависимости подвижности частиц от локальной напряженности  $b = f(E/P)$ .

Зависимость скорости электронов  $V_e = f(E/P)$  от локальной напряженности для различных газов приведена в работе Ю. П. Райзера [4, с. 42] со ссылкой на исследование С. Брауна. На Рис. 1 представлена экспериментальная зависимость  $V_e = f(E/P)$  для кислорода. В результате аппроксимации была получена функциональная зависимость подвижности электронов от локальной напряженности:

$$b_e(E/P) = \left[ 0,05 + \frac{0,276}{(1 + (E/P))^{0,764}} \right].$$

Расчеты показывают, что с ростом напряженности электрического поля подвижность электронов стремится к постоянной величине  $b_e = 0,05 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , что согласуется с результатами экспериментов [6].

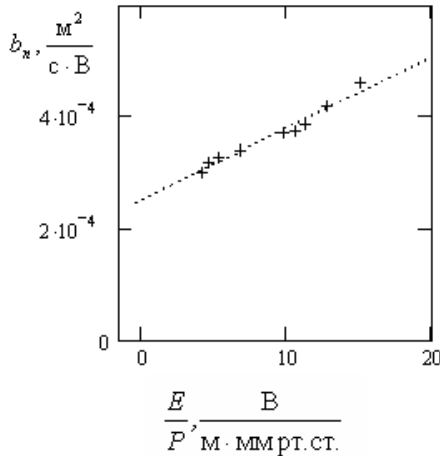


Рис. 2. Зависимость  $b_n = f(E/P)$ :

+ – экспериментальные точки,  
 --- – результат аппроксимации

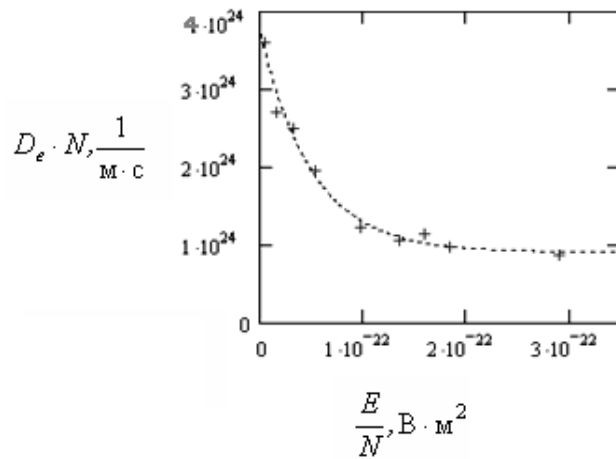


Рис. 3. Зависимость  $D_e \cdot N = f(E/N)$ :

+ – экспериментальные точки,  
 --- – результат аппроксимации

Зависимость подвижности отрицательных ионов  $b_n = f(E/P)$  от локальной напряженности была получена экспериментально И. Балогом. Было установлено, что с увеличением  $E/P$  подвижность ионов в некотором интервале остается постоянной, а затем начинает возрастать. На Рис. 2 представлен график зависимости  $b_n = f(E/P)$ , приведенный в работе Н. А. Капцова [2, с. 269] (участок, на котором  $b_n$  возрастает). Аппроксимация проводилась линейной функцией по методу наименьших квадратов, в результате была получена функциональная зависимость:

$$b_n(E/P) = 2,543 \cdot 10^{-4} + 1,266 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E}{P},$$

которая согласуется с экспериментальными данными [3]. Подвижность положительных ионов  $b_p$  определяется аналогичной функцией, отличающейся только численными коэффициентами.

**3.2. Коэффициенты диффузии.** Для определения коэффициентов диффузии положительных  $D_p$  и отрицательных  $D_n$  ионов применялось соотношение Эйнштейна, связывающее искомые величины с подвижностями:

$$D_p = \frac{k \cdot T}{e} \cdot b_p, \quad D_n = \frac{k \cdot T}{e} \cdot b_n,$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T$  – температура газового разряда,  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд. Однако приведенные формулы справедливы только для ионов в условиях термодинамического равновесия, когда для энергий частиц характерно максвелловское распределение.

Коэффициент диффузии электронов  $D_e$  определялся нами через зависимость  $D_e \cdot N = f(E/N)$ , при этом использовались данные экспериментальных исследований Д. Нельсона, приведенные в работе Дж. Даттона [5]. Экспериментальные точки и аппроксимационная кривая представлены на Рис. 3. Аппроксимационной кривой соответствует функция вида:

$$D_e \cdot N = 2,805 \cdot 10^{24} \cdot e^{-1,993 \cdot 10^{22} \cdot \frac{E}{N}} + 9,023 \cdot 10^{23}.$$

**3.3. Коэффициент ударной ионизации  $\alpha$ .** Для вычисления коэффициента ударной ионизации использовались данные экспериментальных исследований из работы Дж. Даттона [Ibidem] со ссылкой на исследования Д. Прайса. Экспериментальные точки и аппроксимационная кривая  $\alpha = f(E/N)$  представлены на Рис. 4. В результате аппроксимации была получена функция:

$$\alpha(E/N) = 247,482 \cdot e^{1,865 \cdot 10^{19} \cdot \frac{E}{N}} - 149,384.$$

**3.4. Коэффициент прилипания  $\eta$ .** Для определения коэффициента прилипания использовались экспериментальные данные, обобщающие результаты экспериментальных исследований Л. Чанина, П. Чаттертона, Р. Грунберга и др. [Ibidem]. Экспериментальные точки представлены на Рис. 5.

Из рисунка видно, что при локальной напряженности  $E/N > 10^{-19}$  В·м<sup>2</sup> график зависимости  $\eta = f(E/N)$  асимптотически приближается к постоянному значению  $\eta \sim 100$  м<sup>-1</sup>, что существенно ниже коэффициента ионизации для того же значения напряженности  $\alpha \sim 5000$  м<sup>-1</sup>.

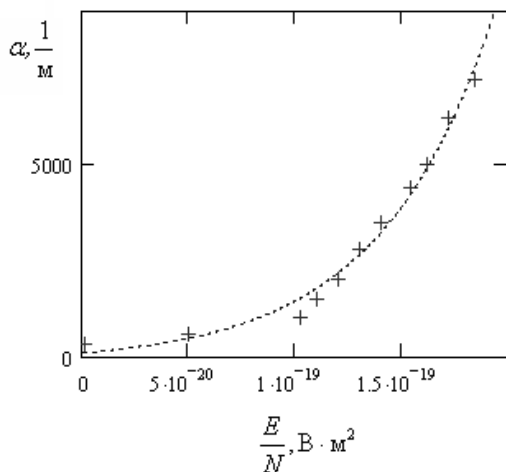


Рис. 4. Зависимость  $\alpha = f(E/N)$ :

+ – экспериментальные точки  
 --- – результат аппроксимации

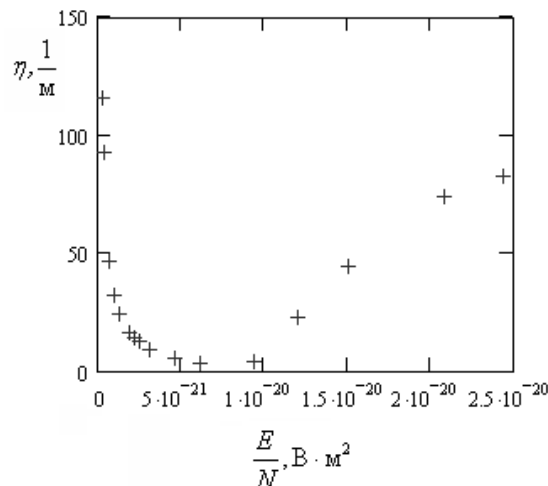


Рис. 5. Зависимость  $\eta = f(E/N)$

**3.5. Коэффициенты электронно-ионной  $\beta_1$  и ион-ионной  $\beta_2$  рекомбинации.** Исследования [4-6] показали, что коэффициенты электронно-ионной  $\beta_1$  и ион-ионной  $\beta_2$  рекомбинации существенно зависят от температуры и мало зависят от локальной напряженности электрического поля. Поэтому в большинстве моделей коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$  с достаточной степенью точности считают постоянными величинами. Так, в модели П. Саттари и К. Адамиака [6]  $\beta_1 \approx 5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , в модели Б. А. Козлова и В. И. Соловьева [3]  $\beta_2 \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ .

**4. Выводы.** Обобщение экспериментальных данных, полученных С. Брауном, И. Балогом, Д. Нельсоном, Д. Прайсом, Л. Чаниным, П. Чаттертоном, Р. Грунбергом и другими исследователями, позволило автору аппроксимировать зависимости параметров модели отрицательной короны в кислороде от локальной напряженности электрического поля (Таблица 1). Вместо набора дискретных экспериментальных точек для коэффициентов определены функции, которые являются непрерывными и дифференцируемыми на всем интервале значений координат и времени протекания коронного разряда. Полученные автором функциональные зависимости коэффициентов подвижности  $b$ , диффузии  $D$ , ударной ионизации  $\alpha$  и прилипания  $\eta$  могут быть использованы для более точного решения системы уравнений Р. Морроу и детального моделирования импульсов Тричеля.

Таблица 1. Значения параметров модели отрицательной короны в кислороде

Коэффициент	Функция аппроксимации
Подвижность электронов	$b_e(E/P) = \left[ 0,05 + \frac{0,276}{(1 + (E/P))^{0,764}} \right]$
Подвижность ионов	$b_n(E/P) = 2,543 \cdot 10^{-4} + 1,266 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E}{P}$
Коэффициент диффузии электронов	$D_e \cdot N = 2,805 \cdot 10^{24} \cdot e^{-1,993 \cdot 10^{22} \cdot \frac{E}{N}} + 9,023 \cdot 10^{23}$
Коэффициент ударной ионизации	$\alpha(E/N) = 247,482 \cdot e^{1,865 \cdot 10^{19} \cdot \frac{E}{N}} - 149,384$
Коэффициент прилипания	$\eta \sim 100 \text{ м}^{-1}$

#### Список литературы

1. **Брант Р. ван.** Физика и химия частичных разрядов и короны: последние достижения и будущие последствия [Электронный ресурс]. URL: [http://sibdiag.ru/modules.php?name=Diagnostica&file=f\\_dr\\_st](http://sibdiag.ru/modules.php?name=Diagnostica&file=f_dr_st) (дата обращения: 19.07.2013).
2. **Капцов Н. А.** Электрические явления в газах и вакууме. М.: Гос. изд-во технико-технической литературы, 1950. 836 с.
3. **Козлов Б. А., Соловьев В. И.** Предельный ток многоостриемого коронного разряда // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. Вып. 7. С. 1-8.
4. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
5. **Dutton J.** A Survey of Electron Swarm Data // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 1975. № 4.
6. **Sattari P., Adamiak K.** Numerical Simulation of Trichel Pulses in a Negative Corona Discharge in Air // Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industry Applications. 2010. Vol. 47. P. 1935-1943.