

УДК 537.525

Сафиуллин Р.К. – доктор физико-математических наук, профессор
E-mail: rksaf@mail.ru**Салаватуллин А.А.** – аспирант
E-mail: inurrick@gmail.com**Муллануров Ф.Ш.** – кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: famu48@mail.ru**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Зайнашева Г.Н. – кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: Guzel_zn@mail.ru**Казанский государственный энергетический университет**

Адрес организации: 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

Энергетическое распределение свободных электронов в плазме тлеющего разряда**Аннотация**

В данной работе представлен эффективный метод расчета ФРЭЭ в тлеющем разряде для газовых смесей, содержащих в качестве компонент CO_2 , CO , N_2 , O_2 , H_2 , He , Ar . Рассчитаны средние скорости, коэффициенты диффузии электронов, энерговклады электронов в поступательно-вращательные и колебательные степени свободы молекул, на ионизацию атомов и молекул. Расчеты проведены для рабочих смесей CO_2 – и CO -лазеров. Рассчитанные характеристики приведены в зависимости от параметров E/N и n (E – напряженность электрического поля, N – суммарная концентрация атомов и молекул, n – мольная доля гелия в смеси). В большинстве случаев получено хорошее или удовлетворительное согласие рассчитанных характеристик с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: тлеющий разряд, функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ), дрейфовая скорость электронов, коэффициент диффузии электронов, средняя энергия электронов.

Энергетическое распределение свободных электронов является одной из важных характеристик низкотемпературной плазмы газового разряда. В тлеющем разряде в рабочих средах CO_2 - и CO -лазеров функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) сильно отличается от максвелловской. Экспериментальное определение ФРЭЭ зондовым или СВЧ-методами сопряжено со значительными техническими трудностями. Чаще всего энергетическое распределение электронов рассчитывают путем решения кинетического уравнения Больцмана [1, 2]. В данной работе произведен численный расчет ФРЭЭ и ряда коэффициентов переноса для лазерных смесей газоразрядных CO_2 -и CO -лазеров.

Уравнение Больцмана для свободных электронов может быть записано в виде [3-5]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{3}(E/N)^2 \frac{d}{du} \left[\frac{uf \, du}{\sum_k \xi_k Q_k^{el}(u)} \right] + (kT/e) \frac{d}{du} \left\{ 2u \frac{df}{du} \sum_k \xi_k \left[u Q_k^{el}(u) \frac{m}{M_k} + 3B_k Q_k^{rot}(u) \right] \right\} + \\ \frac{d}{du} \left\{ 2uf(u) \sum_k \xi_k \left[u Q_k^{el}(u) \frac{m}{M_k} + 3B_k Q_k^{rot}(u) \right] \right\} + \\ \sum_{kms} \xi_k \xi_{km} [(u + u_s) f(u + u_s) Q_s^{in}(u + u_s) - uf(u) Q_s^{in}(u)] + \\ \sum_{kms} \xi_k \xi_{ks} (g_{km} / g_{ks}) [uf(u - u_s) Q_s^{in}(u) - (u + u_s) f(u) Q_s^{in}(u + u_s)] = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $f(u)$ – ФРЭЭ, $\xi_k = N_k/N$, $N = \sum N_k$, $\xi_{km} = N_{km}/N$; N_{km} – плотность молекул k -го сорта, находящихся на m -м уровне внутренней энергии, N – полное число атомов и молекул в единице объема; B_k , $Q_k^{el}(u)$, $Q_k^{rot}(u)$ – постоянная вращения, транспортное

сечение упругого рассеяния электронов на молекуле k -го сорта и сечение возбуждения вращательных степеней свободы молекулы k -го сорта, соответственно; u_s – энергия, теряемая электроном при столкновении с молекулой k -го сорта, при котором молекула переходит с m -го на s -й уровень внутренней энергии; g_{km} , g_{ks} – статистические веса уровней m и s , соответственно. Последние два члена в уравнении (1) описывают неупругие и сверхупругие столкновения электронов с молекулами.

На функцию $f(u)$ накладывается граничное условие $f(\infty) = 0$ и обычное условие нормировки в виде:

$$\int_0^{\infty} u^{1/2} f(u) du = 1. \quad (2)$$

Методика вычисления ФРЭЭ изложена в работах [3-5]. После нахождения ФРЭЭ определяются следующие интегральные характеристики плазмы: дрейфовая скорость электронов V_{dr} в электрическом поле, средняя энергия электронов ϵ , константы скоростей различных кинетических процессов. Они вычисляются по известным формулам [3-5]. На рис. 1-11 представлены некоторые результаты расчетов.

При столкновениях свободных электронов разряда с атомами и молекулами энергия от электронов передается в поступательно-вращательные, колебательные, электронные степени свободы атомов и молекул, а также на их ионизацию.

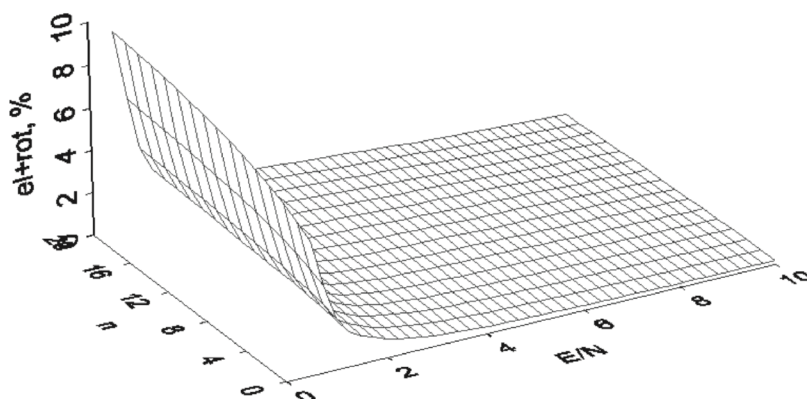


Рис. 1. Энерговклад в поступательно-вращательные степени свободы атомов и молекул.
Смесь $\text{CO}/\text{N}_2/\text{He} = 1/6/n$

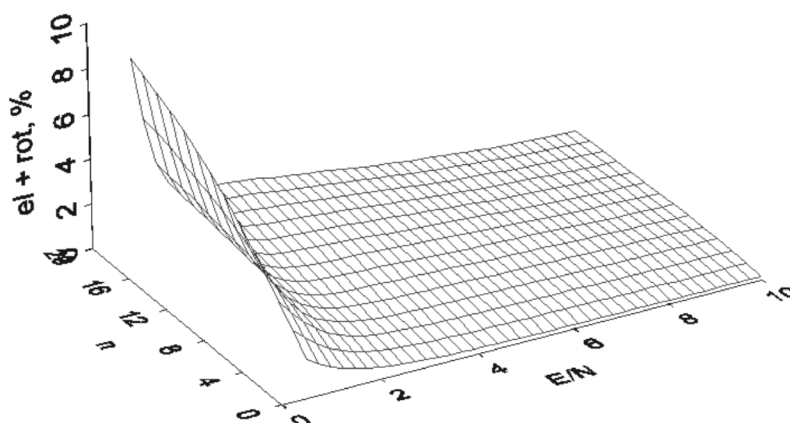


Рис. 2. Энерговклад в поступательно-вращательные степени свободы атомов и молекул.
Смесь $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$

На рис. 1 и 2 приведены рассчитанные зависимости энерговкладов (в процентах от полной энергии, передаваемой от электронов тяжелым частицам) в поступательно-вращательные степени свободы атомов и молекул в смесях CO_2 - и CO -лазеров.

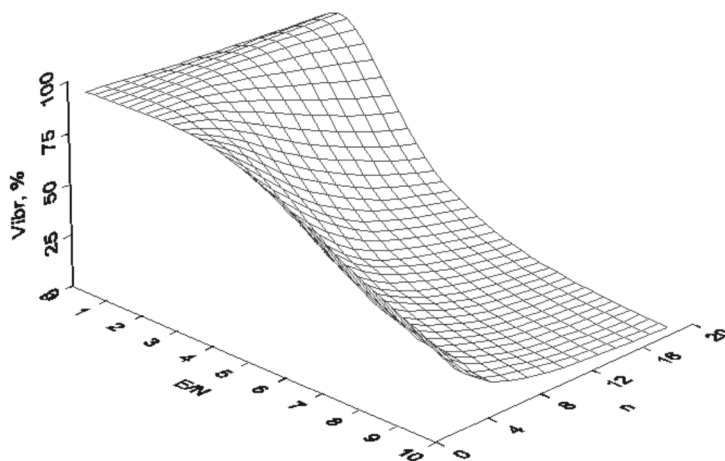


Рис. 3. Энерговклад в колебательные степени свободы молекул. Смесь $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$

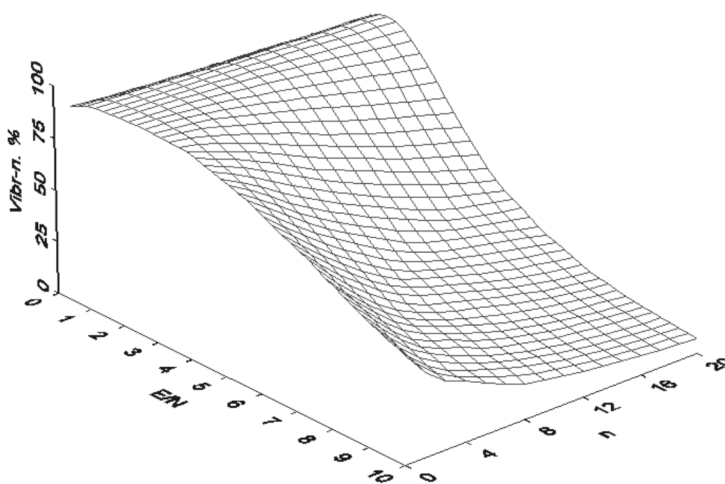


Рис. 4. Энерговклад в колебательные степени свободы молекул. Смесь $\text{CO}/\text{N}_2/\text{He} = 1/6/n$

На рис. 3 и 4 представлены рассчитанные энерговклады в колебательные степени свободы молекул в этих же смесях. На рис. 5 показан энерговклад электронов в ионизацию атомов и молекул в смесях $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$. Следует отметить, что полученные результаты находятся в хорошем соответствии с накопленными экспериментальными данными.

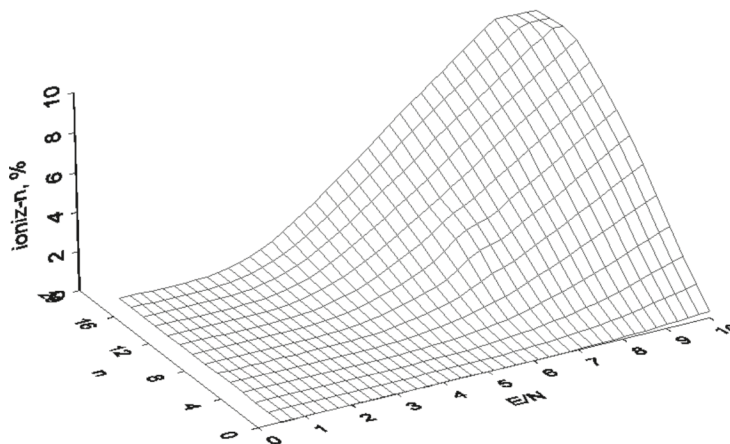


Рис. 5. Энерговклад в ионизацию атомов и молекул. Смесь $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$

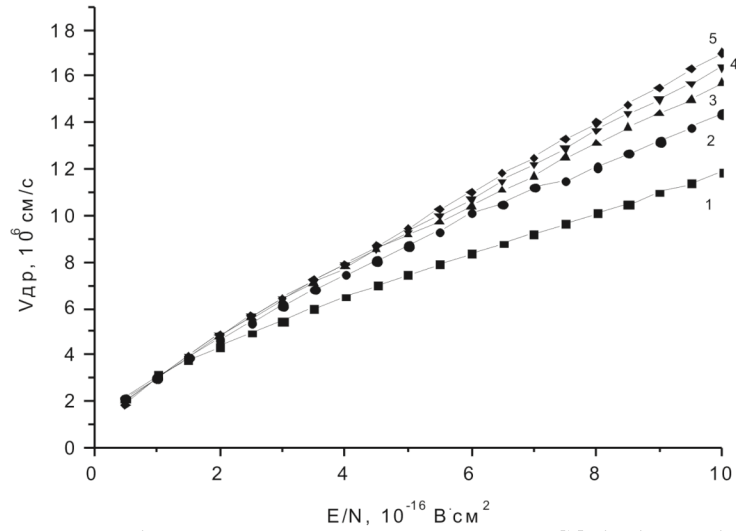


Рис. 6. Дрейфовая скорость электронов в смесях $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$ (кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

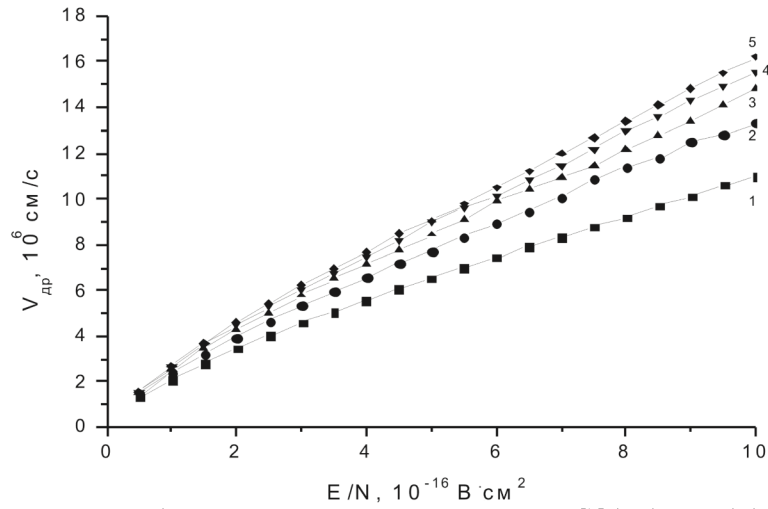


Рис. 7. Дрейфовая скорость электронов в смесях $\text{CO}/\text{N}_2/\text{He} = 1/6/n$ (кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

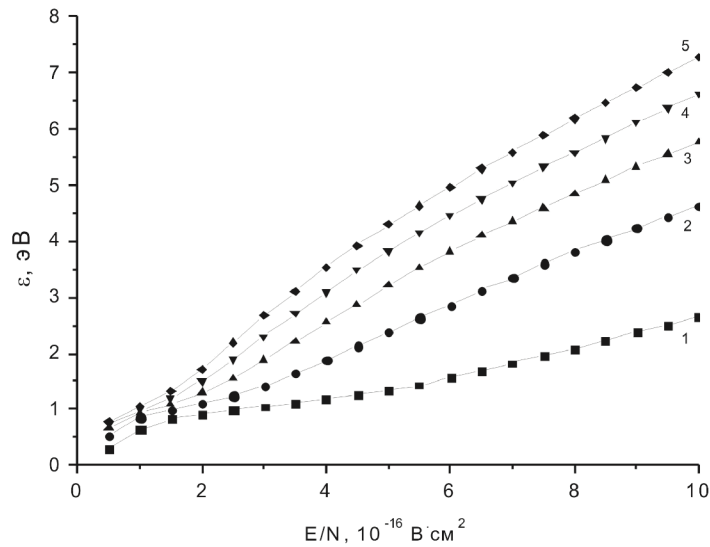


Рис. 8. Средняя энергия электронов в смесях $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$ (кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

Расчеты показывают также, что увеличение содержания гелия в лазерных смесях CO_2 - и CO -лазеров приводит к увеличению дрейфовой скорости, средней энергии и коэффициента диффузии свободных электронов. Это обусловлено уменьшением энергетических потерь свободных электронов на возбуждение вращательных и, главным образом, колебательных степеней свободы молекул CO_2 и N_2 по мере увеличения процентного содержания гелия.

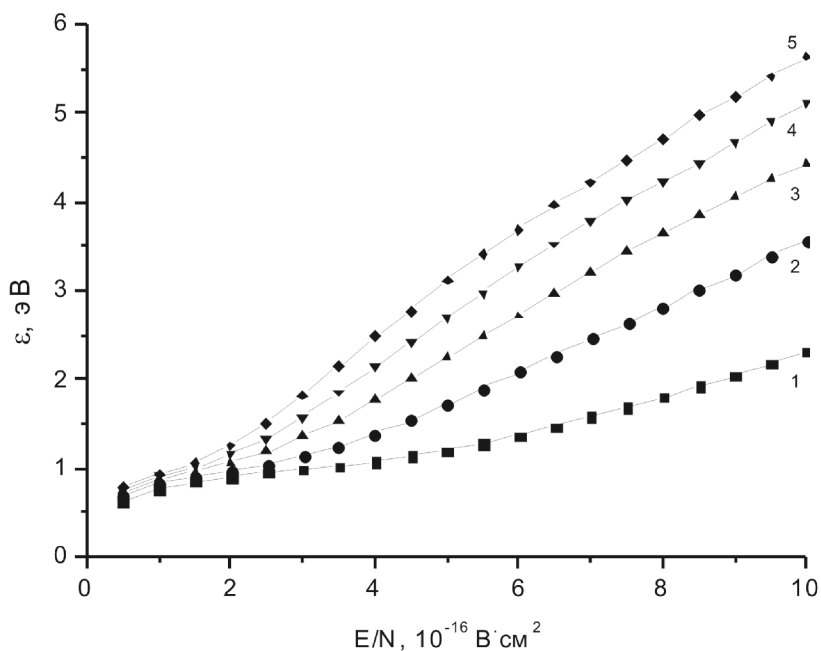


Рис. 9. Средняя энергия электронов в смесях $\text{CO}/\text{N}_2/\text{He} = 1/6/n$
(кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

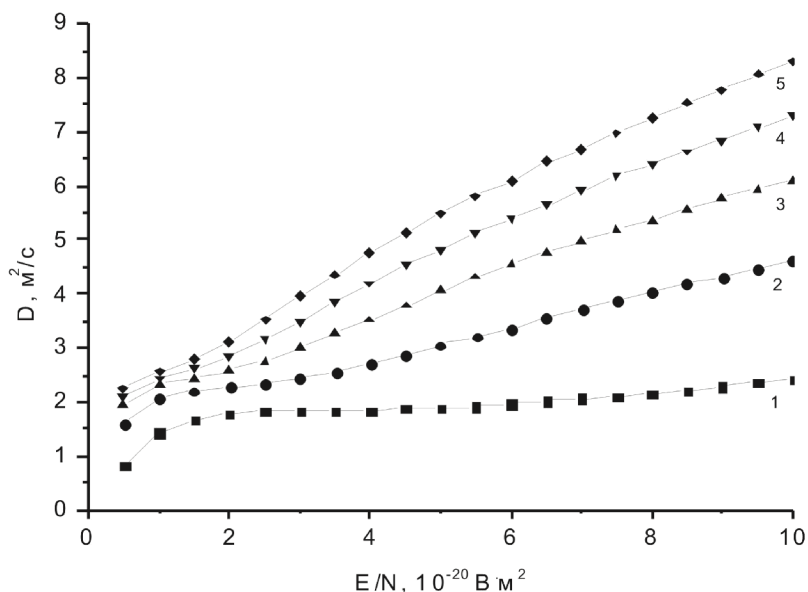


Рис. 10. Коэффициент диффузии электронов в смесях $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{He} = 1/3/n$
(кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

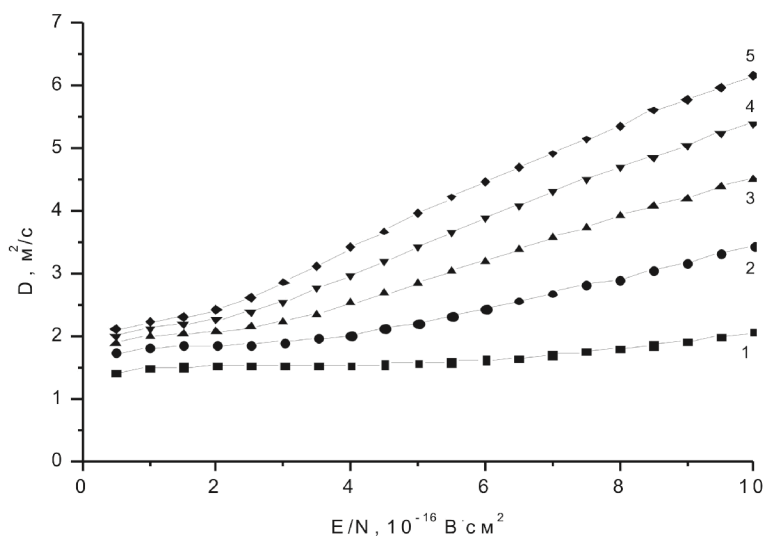


Рис. 11. Коэффициент диффузии электронов в смесях $\text{CO}/\text{N}_2/\text{He} = 1/6/n$.
(кривые 1-5 соответствуют значениям $n = 0, 5, 10, 15$ и 20 , соответственно)

Список библиографических ссылок

1. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. – М.: Мир, 1981. – 516 с.
2. Гордиец Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
3. Арасланов Ш.Ф., Сафиуллин Р.К. Известия вузов. Проблемы энергетики, 1999, № 7-8. – С. 61-68.
4. Сафиуллин Р.К. Расчет констант скоростей ионизации и диссоциативного прилипания электронов к молекулам в газоразрядной плазме // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2001, № 7-8. – С. 55-63.
5. Сафиуллин Р.К. Математическое моделирование процессов в низкотемпературной плазме тлеющего разряда применительно к CO_2 и CO -лазерам // Автореф. докт. дисс. на соиск. степени докт. физ.-мат. наук. – Казань, 2006. – 35 с.

Safiullin R.K. – doctor of physical and mathematical sciences, professor
E-mail: rksaf@mail.ru

Салаватуллин А.А. – post-graduate student
E-mail: inurrick@gmail.com

Mullanurov F.Sh. – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor
E-mail: famu48@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering
The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Zainasheva G.N. – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor
E-mail: Guzel_zn@mail.ru

Kazan State University of Power Energy
The organization address: 420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya st., 51

Energy Distribution of Free Electrons in Glow Discharge Plasma

Resume

Electron energy distribution function (EEDF) is a very important property of gas discharge plasma. It is well known that in glow discharges EEDF strongly differs from the Maxwellian one and so it must be calculated numerically by solution of Boltzmann equation for free electrons of plasma or measured in the very laborious experiments. Knowledge of EEDF

allows one to evaluate important characteristics of gas discharge plasma such as a mean energy of electrons, electron drift velocity, diffusion coefficients and the rates of various kinetic processes due to electron-molecule collisions.

In this paper the effective method for EEDF calculation is described for the gas mixtures containing CO₂, CO, N₂, O₂, H₂, He and Ar species. Numerically calculated characteristics of CO₂- and CO-lasers plasma such as a mean electron energy, electron drift velocity, electron diffusion coefficient, energy contributions of free electrons to translation-rotation and vibration degrees of freedom of molecules are presented. They are depicted as functions of E/N and n (E the electric field strength, N the total particle density of atoms and molecules, n – the relative molar part of He) The information about these characteristics is necessary for the investigation of spatial distributions of charged particles inside the discharge chambers of powerful gas lasers and also for plasma chemistry.

The calculated data are in good or in satisfactory agreement with the available experimental data.

Keywords: glow discharge, electron energy distribution function (EEDF), electron drift velocity, electron diffusion coefficient, mean electron energy.

Reference list

1. Smith K., Thomson R. Computer Modeling of Gas Lasers . – M.: Publishers Mir, 1981.– 512 p.
2. Gordietz B.F., Osipov A.I., Shelepin L.A. Kinetic Processes in Gases and Molecular Lasers. – M.: Publishers Nauka, 1980. – 512 p.
3. Araslanov Sh.F., Safiullin R.K. Energetic Distribution of Electrons in Glow Discharge Plasma // *Izvestya vuzov. Problemy Energetiky*, 1999, № 7-8. – P. 61-68.
4. Safiullin R.K. Calculation of Rates of Ionization and Rates of Electron Dissociative Attachment to Molecules in Gas Discharge Plasma // *Izvestya vuzov. Problemy Energetiky*, 2001, № 7-8. – P. 55-63.
5. Safiullin R.K. Mathematical Modeling of the Processes in Low Temperature Glow Discharge Plasma in Application for CO₂ and CO Lasers // The master's thesis author's abstract of a Doct. Phys.-Math. Sci., Kazan, 2006. – 35 p.