

**Туреханова К.М. \*, Калиева Д.С.**

Казахский национальный университет им. аль-Фараби,  
Казахстан, г. Алматы, \*e-mail: kunduz@physics.kz

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ЭКРАНИРОВКИ И КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДИФРАКЦИИ**

Физика плотной квазиклассической плазмы является одним из фундаментальных направлений в современной физике, в виду того, что исследование свойств такой плазмы представляет значительный интерес, в связи с исследованиями природных явлений, протекающих в астрофизических объектах, созданием научных основ новых плазменных технологий и решением проблемы управляемого термоядерного синтеза. В работе исследованы кинетические процессы плотной квазиклассической плазмы с учетом квантово-механических эффектов дифракции и симметрии и эффекта экранировки. Кинетические характеристики плотной квазиклассической плазмы получены численно на основе эффективного потенциала взаимодействия частиц. Определены зависимости функции распределения электронов в сильном поле от скорости и средняя энергия электронов при этом распределении от скорости. Показано, что учет эффекта экранировки и квантово-механических эффектов дифракции и симметрии в плотной квазиклассической плазме приводит к увеличению средней энергии электронов при увеличении скорости, а также функция распределения частиц в сильном поле увеличивается с уменьшением параметра плотности плазмы. Таким образом, с помощью кулоновского логарифма были получены зависимости длины свободного пробега электронов от параметра неидеальности и плотности плазмы.

**Ключевые слова:** кинетические процессы, квазиклассическая плотная плазма, квантово-механические эффекты дифракции и симметрии, эффект экранировки.

Turekhanova K.M. \*, Kaliyeva D.S.

Al-Farabi Kazakh National University,  
Kazakhstan, Almaty, \*e-mail: kunduz@physics.kz

## **Investigation of kinetic processes in dense plasmas taking into account the effect of screening and quantum mechanical effects of diffraction**

Physics of dense semiclassical plasma is one of the fundamental areas of modern physics, in view of the fact that the study of the properties of such plasma is of considerable interest in connection with studies of natural phenomena occurring in astrophysical objects, the creation of scientific foundations for new plasma technologies and the problem of controlled thermonuclear fusion. In this work we study kinetic processes of dense semiclassical plasma on the basis of the effective interaction potential of particles, taking into account the quantum-mechanical effects of diffraction and the screening effect. Kinetic characteristics of dense semiclassical plasma are obtained numerically using the Coulomb logarithm on the basis of effective potential. The dependence of electron distribution function on the velocity and the dependence of the average electron energy on the velocity were obtained in a strong field. It has been determined that the particle distribution function in a strong field increases with decreasing plasma density parameter, which is connected with into accounting quantum mechanical effects and screening effect. It has been shown that if the quantum-mechanical effects of diffraction and screening effects in dense semiclassical plasma are taken into consideration, then the average electron energy in a strong field would have increase with increasing plasma particles velocity and then the electron free length path curve would have minimum.

**Key words:** kinetic processes, dense semiclassical plasma, screening effects, quantum mechanical effects of diffraction.

Туреханова Қ.М.\* , Қалиева Д.С.

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,  
Қазақстан, Алматы, e-mail: kunduz@physics.kz**Экрандалу және квант-механикалық құбылыстары ескерілетін  
тығыз плазмадағы кинетикалық процестерін зерттеу**

Тығыз квазиклассикалық плазма физикасы қазіргі заманғы физиканың фундаментальді бағыттарының бірі болып табылады. Сол себепті астрофизикалық объектілерде жүріп отыратын табиғи құбылыстарды зерттеуге байланысты, жаңа плазмалық технологиялардың ғылыми негізін қалауға байланысты және басқармалы термоядролық синтездің осы күнге дейін шешілмеген мәселелерін шешуге байланысты тығыз квазиклассикалық плазманың қасиеттерін зерттеу үлкен қызығушылық тудырады. Бұл жұмыста квазиклассикалық тығыз плазмадағы экрандалу құбылысы мен квант-механикалық дифракция мен симметрия құбылыстары ескерілетін кинетикалық процестер зерттелген. Квазиклассикалық тығыз плазмадағы кинетикалық құбылыстар бөлшектердің әсерлесуінің эффективті потенциалы негізінде сандық түрде есептелген. Күшті электр өрісіндегі электрондардың үлестірілу функциясының жылдамдыққа тәуелділігі және осы үлестірілудегі электрондардың орташа энергиясының жылдамдыққа тәуелділігі алынған. Квазиклассикалық тығыз плазмадағы экрандалу және кванттық дифракция мен симметрия құбылыстары ескерілетін болса, жылдамдық өскен сайын электрондардың орташа энергиясының ұлғаятыны көрсетілген, сонымен қатар плазманың тығыздық параметрі төмендеген сайын күшті электр өрісіндегі бөлшектердің үлестірілу функциясының ұлғаятыны байқалған. Сонымен қатар тығыз квазиклассикалық плазмадағы экрандалу және кванттық құбылыстарын ескеретін болсақ, идеал емес параметрдің кейбір мәндері үшін электрондардың еркін жүру жолы қисығында минимумның туындауына әкелетіні көрсетілген.

**Түйін сөздер:** кинетикалық процестер, квазиклассикалық тығыз плазма, квант-механикалық дифракция құбылысы, экрандалу құбылысы.

**Введение**

В настоящее время исследование свойств плотной квазиклассической плазмы представляет большой интерес, связанное со множеством важных практических приложений. Так как квазиклассическая плазма реализуется во многих экспериментальных установках (при реализации идеи импульсного УТС и т.д.). Экспериментальные и теоретические работы по исследованию свойств квазиклассической плазмы связаны с важностью понимания эволюции планет и звезд, недра которых находятся в состоянии плотной, квазиклассической плазмы [1-5]. К числу важнейших физических характеристик квазиклассической плотной плазмы относятся ее кинетические свойства. В работе [6-10] выполнено детальное численное моделирование функций распределения скорости ионов (ФРСИ) методом столкновения Монте-Карло. Исследование моделирования общества показывает, что из-за значительного влияния рассеяния при упругих столкновениях общества не могут быть разделены на два независимых ФРСИ в поперечном и параллельном направлениях электрического поля. С помощью кинетической теории можно определить спектры

высоко заряженных ионов и моделировать их кинетику [11-14]. Расчет столкновительных коэффициентов к настоящему времени остается одной из наиболее актуальных проблем физической кинетики квазиклассической плазмы. Известные приближения, используемые в этом случае, приводят к возникновению не физических расходимости кулоновской составляющей столкновительных коэффициентов при некоторых значениях плазменного параметра  $\Gamma$ .

**Расчет и обсуждение**

В данной работе использованы безразмерные параметры, характеризующие систему: параметр связи  $\Gamma = e^2 / (ak_B T)$ ; параметр неидеальности  $\gamma = e^2 / (r_D k_B T)$ ; безразмерный вид энергии  $E = e / a_B^2$ ; параметр плотности  $r_s = a / a_B$ ,  $r_s = r_D / a_B$ , где  $a$ ,  $r_D$ ,  $a_B$ , – среднее расстояние между частицами, радиусы Дебая и Бора.

Для описания взаимодействия заряженных частиц низкой плотности используется потенциал Дебая-Хюккеля:

$$\Phi_{ab}(r) = \frac{e_a e_b}{r} \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right). \quad (1)$$

В качестве описания взаимодействия заряженных частиц в классической плазме используется псевдопотенциал, который учитывает корреляционные эффекты высших порядков на больших расстояниях [17]:

$$\Phi(R) = \frac{\gamma}{R} e^{-R} \frac{1 + \gamma \frac{f(R)}{2}}{1 + c(\gamma)}, \quad (2)$$

$$f(R) = (e^{-\sqrt{\gamma}R} - 1)(1 - e^{-2R}) / 5,$$

$$c(\gamma) = -0.008617 + 0.455861 \gamma - 0.108389 \gamma^2 + 0.009377 \gamma^3$$

где  $c(\gamma)$  – поправочный коэффициент для разных параметров неидеальности  $\gamma$ , полученный на основе кубической интерполяции.

Также для описания взаимодействия заряженных частиц в квазиклассической плазме используется эффективный потенциал, учитывающий эффекта экранировки и квантовых эффектов [15-19]:

$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{\sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2}} \left( \frac{e^{-Br}}{r} - \frac{e^{-Ar}}{r} \right), \quad (3)$$

где

$$A^2 = \frac{1}{2\lambda^2} \left( 1 + \sqrt{1 - \lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2} \right),$$

$$B^2 = \frac{1}{2\lambda^2} \left( 1 - \sqrt{1 - \lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2} \right),$$

$$r_D = \left( k_B T / \left( 4\pi e^2 \sum_j n_j Z_j^2 \right) \right)^{1/2} - \text{радиус Дебая,}$$

$Z_\alpha e, Z_\beta e$  – электрические заряды  $\alpha$  и  $\beta$  частиц,  $\lambda_{\alpha\beta} = h / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$  – длина де-Бройля,  $m_{\alpha\beta} = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$  – приведенная масса  $\alpha$  и  $\beta$  частиц.

Для постоянного сечения столкновений функция распределения в сильном электрическом поле имеет вид [20-21]:

$$f_0 = A \exp \left[ -\frac{3m_e^2 v^4 \chi_{ea}}{8e^2 E^2 \lambda_{ea}^2} \right], \quad (4)$$

где из условия нормировки

$$A = \frac{0.37}{\pi} \left( \frac{m_e \sqrt{\chi_{ea}}}{e \lambda_{ea} E} \right)^{3/2}. \quad (5)$$

Распределение, описываемое формулой (4), называют распределением Дрюестейна. Его характеризует значительно более сильная зависимость от скорости по сравнению с максвелловским распределением.

Тогда средняя энергия электронов при этом распределении:

$$\langle K_E \rangle = 0.4 \sqrt{m_a / m_e} e E \lambda_{ea}, \quad (6)$$

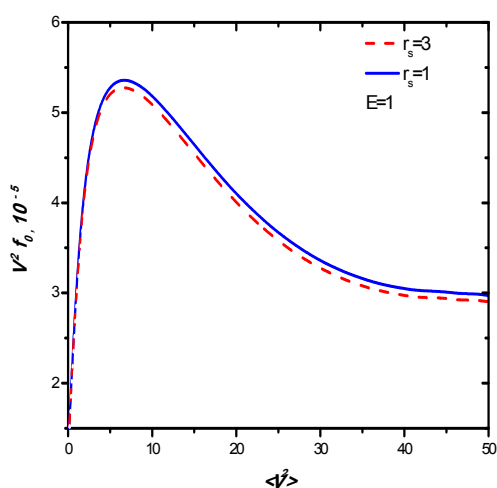
где  $\lambda_{ea}$  – длина свободного пробега электронов. Длина свободного пробега электронов вычислена с помощью кулоновского логарифма [22]. Подставляя конкретное значение потенциала  $\Phi(r)$  вычисляется угол рассеяния, а затем кулоновский логарифм. Решая угол рассеяния частицы, можно получить столкновительные характеристики плотной плазмы [23-25], такие как сечения рассеяния, частоты частиц на основе эффективных псевдопотенциальных моделей.

На рисунке 1 представлены результаты вычисления функции распределения электронов в сильном поле от скорости на основе эффективного потенциала взаимодействия частиц плотной квазиклассической плазмы. Видно, что функция распределения частиц в сильном поле увеличивается с уменьшением параметра плотности плазмы, когда мы учитываем квантово-механические и экранирующие эффекты. Это возможно, связано с уменьшением частот столкновений [26]. На рисунке 2 показано зависимость средней энергий электронов в сильном поле от скорости на основе разных псевдопотенциальных моделей. Для эффективного взаимодействия средняя энергия электронов в сильном поле лежит выше в некоторых значениях скорости, чем соответствующие данные для

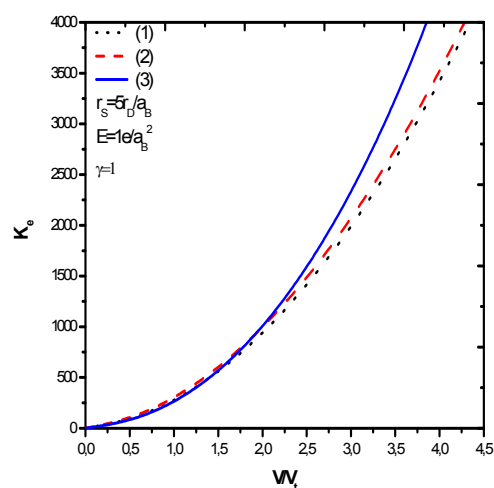
потенциала Дебая-Хюккеля и псевдопотенциала. Средняя энергия электронов, полученное на основе эффективного потенциала взаимодействий частиц, увеличивается с увеличением скорости при учете эффекта экранировки и квантовых эффектов. На рисунке 3 видно, что средняя энергия электронов в сильном поле увеличивается с уменьшением параметра неидеальности. На рисунке 4 приведены резуль-

таты длины свободного пробега электронов от параметра неидеальности.

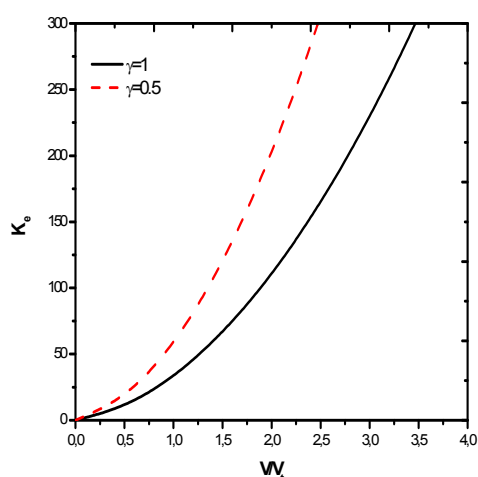
При учете эффекта экранировки и квантовых эффектов дифракции и симметрии, длина свободного пробега электронов имеет минимум в некоторых значениях параметра неидеальности, что связано с образованием некоторых упорядоченных структур в плотной квазиклассической плазме.



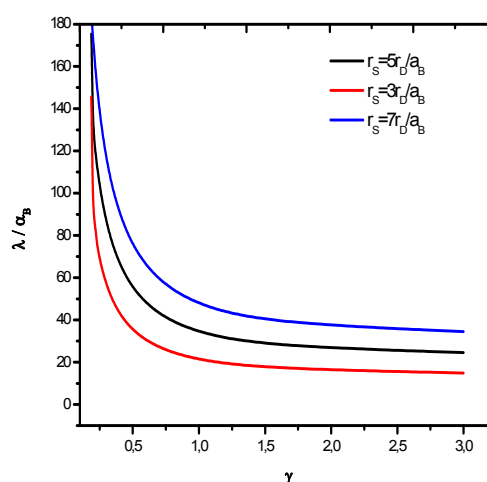
**Рисунок 1** – Зависимость функции распределения электронов в сильном поле от скорости на основе эффективного потенциала (3) плотной квазиклассической плазмы при  $E=1$ ,  $\Gamma=1$  и при разной значений  $\Gamma_s$ .



**Рисунок 2** – Зависимость средней энергии электронов в сильном поле от скорости на основе потенциала (1), (2), (3) плотной плазмы при  $\Gamma_s = 5$ ,  $E=1$ ,  $\gamma=1$ .



**Рисунок 3** – Зависимость средней энергии электронов в сильном поле от скорости на основе эффективного потенциала (3) плотной квазиклассической плазмы при  $\Gamma_s=1$ ,  $E=1$  и при разной значений  $\gamma$ .



**Рисунок 4** – Зависимость длины свободного пробега электронов от параметра неидеальности на основе эффективного потенциала (3) плотной плазмы при разной значений  $\Gamma_s$ .

## Заключение

Таким образом, в работе были исследованы кинетические процессы плотной квазиклассической плазмы с учетом квантово-механических эффектов дифракции и симметрии и эффекта экранировки на основе эффективного потенциала взаимодействия частиц. Были определены зависимости функции распределения электронов в сильном поле от скорости и средняя энергия электронов при этом распределении от скорости. Показано, что

учет эффекта экранировки и квантово-механических эффектов дифракции и симметрии в плотной квазиклассической плазме приводит к увеличению средней энергий электронов при увеличении скорости, а также функция распределения частиц в сильном поле увеличивается с уменьшением параметра плотности плазмы. Таким образом, с помощью кулоновского логарифма были получены зависимости длины свободного пробега электронов от параметра неидеальности и плотности плазмы.

## Литература

- 1 French M., Becker A., Lorenzen W. Ab Initio Simulations for Material Properties Along the Jupiter Adiabatic // *Astrophys. J. Suppl. S.* -2012.-Vol.202.-P.11.
- 2 Capitelli M., Colonna G., De Pascale O. et al. Electron energy distribution functions and second kind collisions// *Plasma sources science and technology.* -2009.-Vol.18.-№1.-P.014014.
- 3 Pietanza L.D., Colonna G., D'Ammando G. et al. Electron energy distribution function and fractional power transfer in "cold" and excited CO<sub>2</sub> discharge and post discharge conditions// *Physics of Plasmas.* -2016.-Vol.23.-Is.1.-P.013515.
- 4 Williams R.J., Guzman F., Badnell N.R. Thermodynamically-consistent semiclassical l-changing rates// *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* -2017.-Vol.50.-№11.-P.1361.
- 5 Wang H., Sukhomlinov V.S., Kaganovich I.D.. Simulations of ion velocity distribution functions taking into account both elastic and charge exchange collisions// *Plasma Sources Science and Technology.* -2017.-Vol.26.-№2.-P.024002.
- 6 Khanzadeh H., Mahdavi M. The semiclassical properties of the electron spin on the plasma unstable electromagnetic modes // *Chinese J. of Phys.* -2017.-Vol.55.-№5.-P.1922-1929.
- 7 Tsolas N., Yetter R.A., Adamovich I.V. Kinetics of plasma assisted pyrolysis and oxidation of ethylene. Part 2: Kinetic modeling studies // *Combustion and Flame.* -2017.-Vol.176.-P.462-478.
- 8 Squire J., Kunz M. W., Quataert E., Schekochihin A. A. Kinetic simulations of the interruption of large-amplitude shear-Alfvén waves in a high-beta plasma// *Phys. Rev. Lett.* -2017.-Vol.119.-P.155101.
- 9 Goyal R. and Sharma R. P. Effect of ion-neutral collisions on the evolution of kinetic Alfvén waves in plasmas // *Plasma Physics and Controlled Fusion.* -2018.- Vol. 60.- №3.-P.1361.
- 10 Csanak G., Fontes C.J. et al. Kinetic equations for cylindrically symmetric plasmas including atomic coherence and Coulomb potential effects // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* -2011.-Vol.44.-P.215701.
- 11 Norman D.C. Models of the Atomic Nucleus // Heidelberg: Springer.-2010.- P. 324.
- 12 Majka M. and Gora P.F. Analytical theory of effective interactions in binary colloidal systems of soft particles // *Phys. Rev. E.* -2014.-Vol.90.-P.032303.
- 13 Baalrud S.D. and Daligault J. Effective Potential Theory for Transport Coefficients across Coupling Regimes // *Phys. Rev. Lett.* -2013.-Vol.110.-P.235001.
- 14 Baalrud S.D., and Daligault J. Extending plasma transport theory to strong coupling through the concept of an effective interaction potential // *Phys. Plasmas.* - 2014.-Vol.21.-P.055707.
- 15 Ramazanov T.S. and Dzhumagulova K.N. Effective screened potentials of strongly coupled semiclassical plasma // *Phys. Plasmas.* -2002.-Vol. 9.-P. 3758.
- 16 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Omarbakiyeva Y.A. Effective polarization interaction potential "charge-atom" for partially ly ionized dense plasma // *Phys. Plasmas.* - 2005. - Vol.12.- P.092702
- 17 Baimbetov F.B., Ramazanov T.S., Nurekenov Kh.T. Pseudopotential theory of classical non-ideal plasma // *Phys. Lett. A.* -1995. -Vol.-202.-P.211.
- 18 Baimbetov F. B., Nurekenov Kh.T., and Ramazanov T. S. Transport properties of non-ideal plasmas // *Plasma Phys. and Plasma Techn.* -1994.-P. 39-42.
- 19 Baimbetov F.B., Bekenov M.A, and Ramazanov T.S. Effective potential of a semiclassical hydrogen plasma // *Phys. Lett. A.* -1995.-Vol. 197.-P. 157-158.
- 20 Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы // М.: Физматлит.- 2004.-С. 528.
- 21 Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы.-М.:Атомиздат.-1977.-С.47-64.
- 22 Ramazanov T.S., Kodanova S.K. Coulomb logarithm of a nonideal plasma // *Phys. Plasmas.* -2001.-Vol.8.-P.5049.
- 23 Морозов И.В., Норман Г. Э. Столкновения и плазменные волны в неидеальной плазме // *ЖЭТФ.* - 2005.- Т. 127.- № 2.- С. 412.
- 24 Ланкин А.В. Столкнительная рекомбинация в неидеальной плазме // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике.* -2008.-С.2.

- 25 Гуревич А.В., Питаевский Л.П. Коэффициент рекомбинации в плотной низкотемпературной плазме // ЖЭТФ.- 1964.- Т. 46.- С. 1281.
- 26 Ramazanov T.S., Turekhanova K.M. Runaway electrons in a fully and partially ionized nonideal plasma//Phys. Plasmas.- 2005.-Vol.12.-P.102502.

#### References

- 1 M. French, A. Becker, W. Lorenzen, *Astrophys. J. Suppl.S.* 202, 11 (2012).
- 2 M. Capitelli, G. Colonna, et al. *Plasma sources science and techn.* 18, 014014 (2009).
- 3 L.D. Pietanza, G. Colonna, et al. *Physics of Plasmas.* 23, 013515 (2016).
- 4 R.J.Williams, F.Guzman, N.R.Badnell. *J.Phys.B:At. Mol. Opt. Phys.* 50, 1361 (2017).
- 5 H. Wang, V. Sukhomlinov, et al. *Plas. Sour. Sc. Tech.* 26, 024002 (2017).
- 6 H. Khanzadeh and M. Mahdavi. *Chinese J. of Phys.* 55, 1922-1929 (2017).
- 7 N. Tsolas, R. A.Yetter, and I. V.Adamovich. *Combustion and Flame.* 176, 462-478 (2017).
- 8 J.Squire, M.W.Kunz, and A.A.Schekochihin, *Phys.Rev.Lett.* 119, 155101 (2017).
- 9 R. Goyal and R. P. Sharma. *Plasma Physics and Controlled Fusion.* 60, 1361 (2018).
- 10 G. Csanak, et al. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 44, 215701 (2011).
- 11 D.C. Norman. Heidelberg: Springer. p.324. (2010).
- 12 M. Majka and P.F. Gora. *Phys. Rev. E,* 90, 032303 (2014).
- 13 S.D. Baalrud and J. Daligault, *Phys. Rev.Lett.* 110, 235001 (2013).
- 14 S.D. Baalrud and J. Daligault. *Phys. Plasmas,* 21, 055707 (2014).
- 15 T.S. Ramazanov and K.N. Dzhumagulova, *Phys. Plasmas.* 9, 3758 (2002).
- 16 T.S. Ramazanov and K.N. Dzhumagulova, *Phys.Plasmas,* 12, 092702 (2005).
- 17 F.B. Baimbetov, T.S. Ramazanov, and Kh.T. Nurekhenov, *Phys.Lett.A,* 202, 211 (1995).
- 18 F.B.Baimbetov and Kh.T. Nurekenov. *Plasma Phys and Plasma Techn,* 39-42 (1994).
- 19 F.B. Baimbetov, M.A. Bekenov, and T.S. Ramazanov. *Phys. Lett. A.* 197. 157-158 (1995).
- 20 V.E. Fortov, A.G. Hryapak, and I.T. Yakubov. *Fizika neideal'noy plazmy* (M.: Physmatlit, 2004), p.528. (in Russ).
- 21 Ye. Golant, A.P. Zhilinskiy, and S.A. Sakharov, *Osnovy fiziki plazmy* (Moscow: Atomizdat, 1977), pp. 47-64. (in Russ).
- 22 T.S. Ramazanov and S.K. Kodanova, *Phys. Plasmas,* 8, 5049 (2001).
- 23 I.V. Morozov and G.E. Norman, *JETPh,* 127. 412 (2005). (in Russ).
- 24 A.V. Lankin. *Phys-chem.kin.gas dyn.* p. 2 (2008). (in Russ).
- 25 A.V. Gurevich and L.P. Pitaevskiy, *JETPh,* 46, 1281 (1964). (in Russ).
- 26 T.S. Ramazanov and K.M. Turekhanova, *Phys. Plasmas,* 12, 102502 (2005).