

**Рамазанов Т.С.\* , Коданова С.К., Бастыкова Н.Х.,  
Молдабеков Ж.А., Агатаева А.А.**

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

## **КЛАССИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНА ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭФФЕКТА ПОЛЯРИЗАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ**

В данной работе были исследованы классические процессы рассеяния и поглощения ионов пылевой частицей. Были получены поправки к классическим сечениям рассеяния и поглощения ионов за счет эффекта поляризации пылевых частиц, для низко заряженной пылевой частицы (с зарядом  $Z = 10$ ). При исследовании газов с низкой плотностью и степенью ионизации или при наличии относительно слабого излучения в межзвездном пространстве важно знать динамику пылевой частицы с низким зарядом. Траектория иона вокруг пылевой частицы используется для визуальной иллюстрации влияния поляризации пылевых частиц на рассеяние. Поправка к сечению рассеяния из-за поляризации пылевых частиц может быть до 25%, в режиме сильной ионно-пылевой связи и до 10% в случае с умеренной связью. Коррекция к сечению поглощения оказывается почти постоянной (14%) для умеренной, а также сильной ионно-пылевой связи. Полученные результаты показывают, что эффект поляризации пылевых частиц важен для понимания динамики пылевых частиц в криогенной пылевой плазме.

**Ключевые слова:** Комплексная плазма, сечение рассеяния, сечение поглощения, эффект поляризации пылевых частиц.

Ramazanov T.S.\* , Kodanova S.K., Bastykova N.Kh.,  
Moldabekov Zh.A., Agatayeva A.A.

IETP, Al-Farabi Kazakh National university,  
Almaty, Kazakhstan, \*e-mail: ramazan@physics.kz

## **Classical scattering of an ion influenced by polarization effect of dust particles**

In this paper, the classical processes of scattering and absorption of ions by a dust particle was investigated. Corrections to the classical ion-grain scattering and capture cross sections due to polarization charges on the dust particle, which acts as an image charge, have been obtained for a low charged grain (with the charge number  $Z = 10$ ). The trajectory of the ion around the dust particle is used for visual illustration of the influence of the grain polarization on scattering. The correction to the scattering cross section due to the image force can be as large as 25 % in the strong ion-grain coupling regime and up to 10 % in the moderately coupled case. The correction to the capture cross section turns out to be nearly constant (14 %) for moderate as well as strong ion-grain coupling. In studies of gases with low density and degree of ionization, or in the presence of relatively weak radiation in interstellar space, it is important to know the dynamics of a dust particle with a low charge.

**Key words:** Complex plasma, Scattering cross section, Collection cross section, Polarization of the dust particle.

Рамазанов Т.С.\*, Қоданова С.К., Бастықова Н.Х.,  
Молдабеков Ж.А., Ағатаева А.Ә.

ЭТФҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,  
Алматы қ., Қазақстан, \*e-mail: ramazan@physics.kz

### Тозаңды бөлшек поляризациясының әсерінен иондардың тозаңды бөлшекте классикалық шашырауы

Бұл жұмыста иондардың классикалық шашырау және жұтылу қималары зерттелді. Тозаңды бөлшектердің поляризация эффектінен болатын иондардың классикалық шашырау және жұтылу қималарына түзетулер (тозаңды бөлшек зарядының аз мәнінде  $Z = 10$ ) алынды. Тозаңды бөлшек динамикасы (тозаңды бөлшек зарядының аз мәнінде) тығыздығы және иондалу дәрежесі төмен газдарды немесе жұлдызаралық кеңістікті зерттеу кезінде маңызды. Иондардың тозаңды бөлшек айналасындағы траекториясы тозаңды бөлшек поляризациясының шашырауға әсерін анықтау үшін келтірілген. Поляризация эффектінің әсерінен шашырау қимасына түзету күшті байланыс кезінде 25% дейін және әлсіз байланыс кезінде 10% жетуі мүмкін. Жұтылу қимасына түзету күшті және әлсіз байланыс үшін 14% құрайды ( $\beta$  барлық мәнінде). Алынған нәтижелер тозаңды бөлшек поляризациясының криогенді тозаңды плазмадағы тозаңды бөлшек динамикасын түсіну үшін қажет екендігін көрсетеді.

**Түйін сөздер:** Кешенді плазма, шашырау қимасы, жұтылу қимасы, тозаңды бөлшектің поляризация эффекті.

#### Введение

Помещенная в плазму пылевая частица становится заряженной, поэтому необходимо изучить процессы зарядки и процессы связанные с передачей импульса из за упругих и неупругих столкновений частиц плазмы с пылевой частицей. Существует огромное количество экспериментальных данных, теоретических моделей о статических и динамических свойствах пылевой плазмы [1-7], а также компьютерное моделирование процессов зарядки пылевой частицы [8,9]. Было установлено, что пылевые частицы могут существенно менять свойства плазмы [10-12]. Влияние пылевой частицы зависит от плотности числа пылевых частиц и от ионного и электронного сечения рассеяния.

Знание величины силы ионного увлечения в широком диапазоне параметров плазмы необходимо для понимания многих процессов в космической и в лабораторной пылевой плазме. Сила ионного увлечения – сила связанная с передачей импульса от плазменных частиц к пылевым частицам. И эта передача связана с двумя процессами: передача импульса при неупругих столкновениях (поглощение ионов пылевой частицей) и передачей импульса в упругих столкновениях (рассеяние ионов в электрическом поле частицы). Передача импульса между различными компонентами играет чрезвычайно важную роль в комплексной плазме. Передача импульса от ионов к заряженной частице играет важную

роль в таких процессах как пространственное расположение пылевых частиц [13], вращение пылевой структуры при наличии внешнего магнитного поля [14], процесс диффузии невзаимодействующих Броуновских пылевых частиц [15], волновых дисперсии пылевых частиц [16], образование войдов [17] и т.д. Обычно поляризация в пылевой плазме пренебрегают. Поэтому целью этой работы является изучение поправки к сечениям рассеяния и поглощения и к силе ионного увлечения [18,19].

Процесс рассеяния характеризуется следующими безразмерными параметрами: параметр связи  $\beta = e^2 Z / m v^2 \lambda$ , радиус пылевой частицы нормализуется Дебаевской длиной  $\alpha = a / \lambda$ . В экспериментах с газовым разрядом ионная температура  $\sim 300\text{K}$ , электронная температура  $\sim 1-3$  эВ  $\beta = 1 - 30, z \sim 10^3 - 10^4$  Для пылевой частицы с таким большим зарядом эффектом поляризации пылевых частиц можно пренебречь [20]. Однако в экспериментах на криогенных условиях [21-23], когда  $z=10$  эффект поляризации пылевых частиц становится важной. В криогенной пылевой плазме температура нейтрального атома находится от  $\sim 5\text{K}$  до  $\sim 100\text{K}$ , параметр связи  $\beta \sim 1 - 100$ . Динамика пылевой частицы с низким зарядом может вызвать интерес к исследованию газов с низкой плотностью и степенью ионизации или при наличии относительно слабого излучения в межзвездном пространстве. Поэтому в работе [21,24] главным образом приведены эксперименты по криогенной комплексной плазме  $z = 10; 1 \leq \beta \leq 100$ .

### Процессы рассеяния

В этой работе влияние поляризации пылевых частиц на рассеяние положительно заряженного иона от отрицательно заряженных пылевых частиц рассматривается на основе следующего потенциала взаимодействия ионов с пылевой частицей [20]:

$$U(r) = - \left[ \frac{\varepsilon^2 z}{r} + \frac{\varepsilon \varepsilon^2 a^3}{2r^2(r^2 - a^2)} \right] \exp(-rK_D), \quad (1)$$

$K_D$  – длина обратного экранирования ( $1/\lambda_D$ ),  $a$  – радиус пылевых частиц,  $\varepsilon = \frac{(\varepsilon_d - 1)}{\varepsilon_d} + 1$  – для диэлектрических пылевых частиц. Первый член уравнения относится к потенциалу Юкава, а второе слагаемое поправка парного взаимодействия вызванная эффектом поляризации.

Классический угол рассеяния для двух частиц с массой  $m_1, m_2$  и с потенциалом взаимодействия  $U(R)$  для заданного прицельного параметра  $\rho$  равен:

$$\chi(\rho) = |\pi - 2\varphi(\rho)|, \varphi(\rho) = \rho \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{r^2 \sqrt{1 - U_{eff}(r, \rho)}} \quad (2)$$

и эффективная энергия взаимодействия  $U_{eff}$  в единицах кинетической энергии  $E = \frac{mv^2}{2}$  с учетом центробежной силы

$$U_{eff}(r, \rho) = \frac{\rho^2}{r^2} + \frac{2U(r)}{mv^2} \quad (3)$$

Сечение упругого рассеяния можно получить с помощью угла рассеяния  $\chi(\rho)$  стандартным образом [25]:

$$\sigma_s = 2\pi \int_0^{\infty} (1 - \cos\chi(\rho)) \rho d\rho \quad (4)$$

где, расчеты должны быть выполнены с учетом условия, что расстояние ближайшего подхода больше радиуса пылевой частицы  $r_0 > a$ .

Коллективное сечение рассеяния рассчитывается по следующей формуле [26]:

$$\delta_c = \pi \rho_c^2, \rho_c = a \sqrt{1 + 2\beta \left(\frac{\lambda}{a}\right)} \quad (5)$$

Поглощение ионов происходит когда прицельный параметр иона меньше чем параметр захвата ( $\rho < \rho_c$ ). В случае экранированного потенциала (1) прицельный параметр захвата получается из условия, что расстояние ближайшего подхода  $r_0$  меньше ( $r_0 < a$ ).

На рисунке 1 (а) эффективный потенциал (3) для радиального движения ионов в поле пылевой частицы, полученные с использованием потенциала Юкавы и потенциала взаимодействия (1) при  $\alpha = 0.1, z = 10, \beta = 100$  при разных прицельных параметрах  $\frac{\rho}{\lambda}$ . Как видно, эффект поляризации важен на малых расстояниях вблизи поверхности пылевой частицы. Для рассматриваемых значений прицельного параметра, появляется отклонение от результата Юкавы при  $a < r < 0.2\lambda$

На рисунке 1 (б) показаны расстояния минимального (ближайшего) подхода, полученного с использованием потенциала (1) по сравнению с расчетами полученными с использованием потенциала Юкава. Когда учитывается эффект поляризации значение  $r_0$  больше, чем когда ею пренебрегают. Следовательно, это приводит к увеличению радиуса поглощения ионов пылевой частицей.

На рисунке 2 (а) зависимость угла рассеяния от прицельного параметра. Сплошной линией показан угол рассеяния на основе потенциала Юкава. При меньших значениях прицельного параметра видны отклонения потенциала Юкава от потенциала взаимодействия.

На рисунке 2 (б) траектория ионов вокруг пылевой частицы. Когда  $\alpha = 0.1$  и учитывается эффект поляризации угол рассеяния соответственно больше. Когда  $\alpha = 0.3$  ион поглощается в пылевой частице.

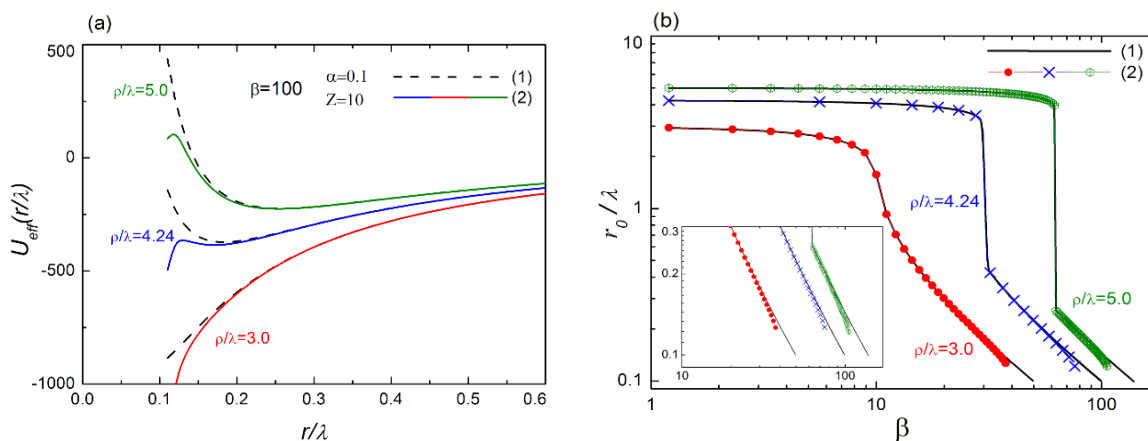
$$F_{i,orb} \sim \sigma_s, F_{i,coll} \sim \sigma_c$$

а)  $\sigma_s, \sigma_c$  – сечение найденное с учетом потенциала Юкава.

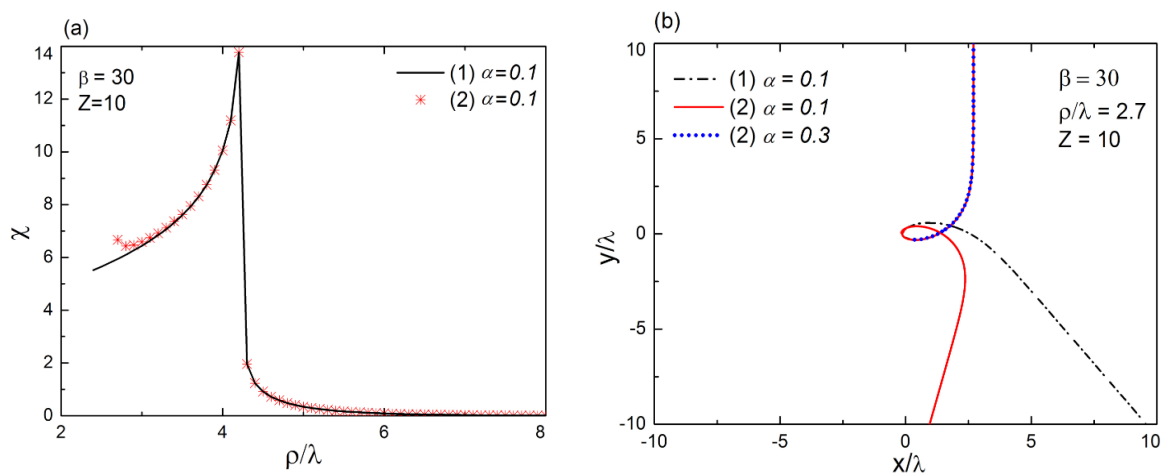
б)  $\sigma_s^*, \sigma_c^*$  – сечение найденное с учетом потенциала взаимодействия.

Показаны сечения рассеяния и поглощения для потенциала Юкавы и потенциала взаимодействия (Рис. 4а). Видно что эффект поляризации пылевых частиц может возрастать сечение рассеяния при  $30 < \beta < 80$  и уменьшатся при  $1 < \beta < 30$  и  $80 < \beta < 100$ .

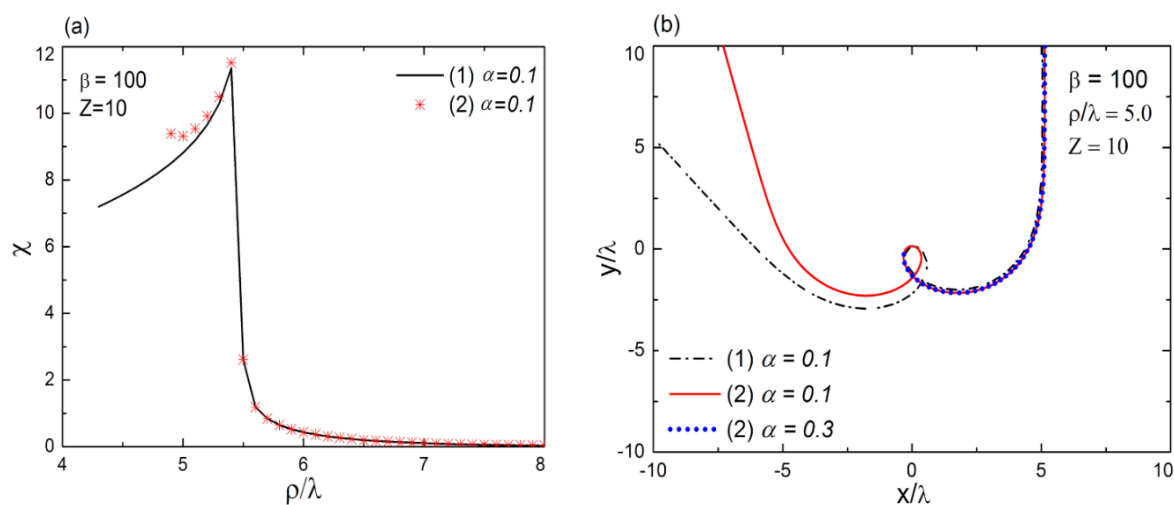
На рисунке 5 приведены отношение сечения рассеяния и поглощения. Поправка к сечению рассеяния составляет 25 %. Поправка к сечению поглощения составляет 14 % во всех значениях  $\beta$ . Так как сила ионного увлечения прямо пропорционален к сечению, то эти поправки относятся и к силе ионного увлечения.



**Рисунок 1** – а) Эффективные потенциалы для радиального движения ионов вокруг пылинки от разных прицельных параметров; б) Зависимость минимального расстояния между ионом и пылевой частицей от параметра связи. (1) Потенциал Юкавы, (2) Потенциал взаимодействия



**Рисунок 2** – а) Угол рассеяния. б) Траектория ионов во время соударения с пылевой частицей. (1) Потенциал Юкавы, (2) Потенциал взаимодействия



**Рисунок 3** – а) Угол рассеяния. б) Траектория ионов во время соударения с пылевой частицей (1) Потенциал Юкавы, (2) Потенциал взаимодействия

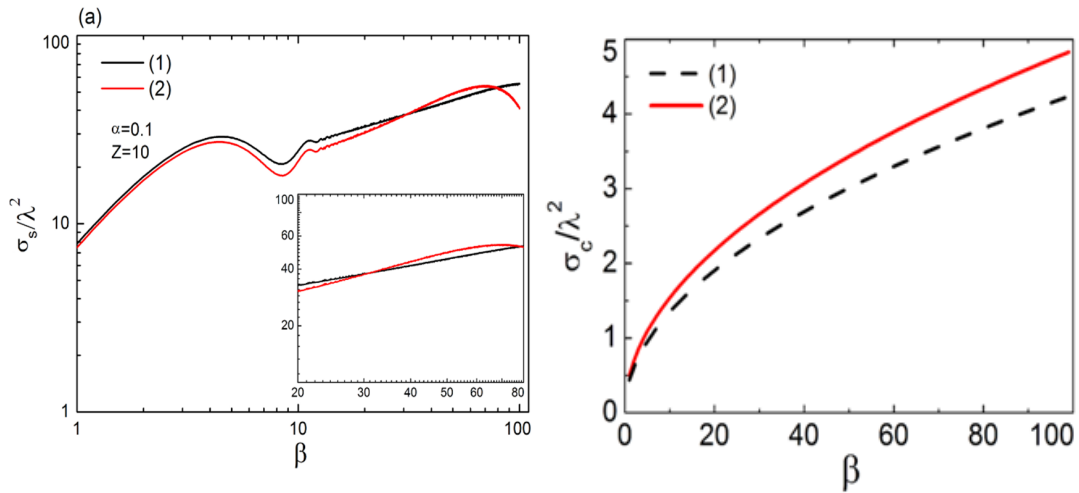
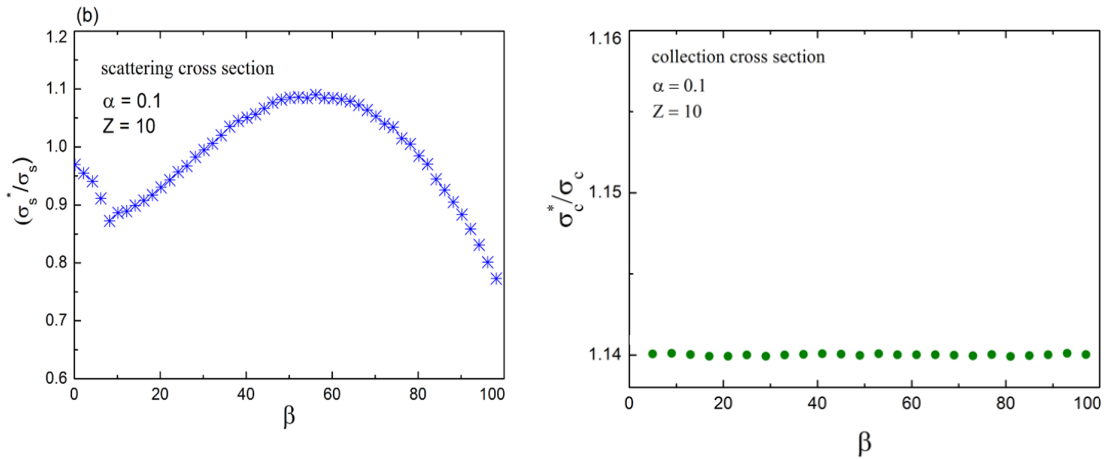


Рисунок 4 – а) Сечение рассеяния. б) Сечение поглощения (1) Потенциал Юкавы, (2) Потенциал взаимодействия



$$F_{i,orb} \sim \sigma_s, F_{i,coll} \sim \sigma_c$$

Рисунок 5 – Отношение сечений

### Закключение

В данной работе представлены поправки к сечению рассеяния и поглощения ионов пылевой частицей из за поляризации, для случая  $z = 10$  и  $\lambda = 0.1$ . Поправка к сечению поглощения слабое но постоянное 14 % для  $1 \ll \beta \ll 100$ . Однако, поправка к сечению рассеяния ионов из за поляризации пылевых частиц является не монотонной и может быть значимой для определенных значений (до 25% при  $\beta \approx 100$ ). Параметры расчетов относятся к криогенной пылевой

плазме. Полученные результаты показывают, что эффект поляризации пылевых частиц важен для понимания динамики пылевых пылевых частиц в криогенной пылевой плазме.

### Благодарности

Выполненные исследования проведены в рамках проекта №AP05133536 «Исследование свойств низкотемпературной комплексной плазмы во внешнем магнитном поле (2018-2020 гг.)» КН МОН РК.

### Литература

- 1 Wattieaux G. and Boufendi L. Discharge impedance evolution, stray capacitance effect, and correlation with the particles size in a dusty plasma // *Phys. Plasmas*. – 2012. – Vol. 19. – P. 33701.
- 2 Wattieaux G., Mezeghrane A. and Boufendi L. Electrical time resolved metrology of dust particles growing in low pressure cold plasmas // *Phys. Plasmas*. – 2011. – Vol. 18. – P. 093701.
- 3 Ussenov Y.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N. and Dosbolayev M.K. Application of dust grains and Langmuir probe for plasma diagnostics // *EPL* – 2014. – Vol. 105. – P. 15002.
- 4 Orazbayev S.A., Muratov M.M., Ramazanov T.S., Dosbolayev M.K., Silamiya M., Jumagulov M.N. and Boufendi L. The diagnostics of dusty plasma in RF discharge by two different methods // *Contrib. Plasma Phys.* – 2013. – Vol. 53. – P. 5.
- 5 Maiorov S.A., Kodanova S.K., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S., Golyatina R.I., Bastykova N.Kh. and Utegenov A.U. The role of gas composition in plasma-dust structures in RF discharge // *Phys. Plasmas*. – 2015. – Vol. 22. – P. 033705.
- 6 Quinn R.A. and Goree J. Single-particle Langevin model of particle temperature in dusty plasmas // *Phys. Plasmas*. – 2000. – Vol. 7. – P. 10.
- 7 Bonitz M., Henning C. and Block D. Complex plasmas: a laboratory for strong correlations // *Rep. Prog. Phys.* – 2010. – Vol. 73. – P. 066501.
- 8 Fortov V.E., Petrov O.F., Usachev A.D. and Zobnin A.V. Micron-sized particle-charge measurements in an inductive rf gas-discharge plasma using gravity-driven probe grains // *Physical Review E*. – 2004. – Vol. 70. – P. 046415.
- 9 Kodanova S.K., Bastykova N.Kh., Ramazanov T.S. and Maiorov S.A. Dust Particle Evolution in the Divertor Plasma // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2016. – Vol. 44. – P. 525.
- 10 Fedoseev A.V., Sukhinin G.I., Ramazanov T.S., Kodanova S.K. and Bastykova N.Kh. Interaction between glow discharge plasma and dust particles // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2011. – Vol. 18. – P. 615.
- 11 Iwashita S., Schngel E., Schulze J., Hartmann P., Donko Z., Uchida G., Koga K., Shiratani M. and Czarnetzki U. Transport control of dust particles via the electrical asymmetry effect: experiment, simulation and modeling // *J.Phys. D: Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 46. – P. 245202.
- 12 Sukhinin G.I. and Fedoseev A.V. Influence of dust-particle concentration on gas-discharge plasma // *Phys. Rev. E*. – 2010. – Vol. 81. – P. 016402.
- 13 Barnes M.S. and et.al. Transport of dust particles in glow-discharge plasmas // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – Vol. 68. – P. 313.
- 14 Konopka U. and et.al. Pattern formation in a complex plasma in high magnetic fields // *Phys. Rev. E*. – 2000. – Vol. 61. – P.1890.
- 15 Trigger S.A. Fokker-Planck equation for Boltzmann-type and active particles: Transfer probability approach // *Phys. Rev. E*. – 2003. – Vol. 67. – P. 046403.
- 16 D'Angelo N. Dusty plasma ionization instability with ion drag // *Phys. Plasmas*. – 1998. – Vol. 5. – P. 3155.
- 17 Fedoseev A.V., Sukhinin G.I., Dosbolayev M.K. and Ramazanov T.S. Dust-void formation in a dc glow discharge // *Phys. Rev. E*. – 2015. – Vol. 92. – P. 023106.
- 18 Jackson J. *Classical electrodynamics*. – NY: Wiley, 1999. – 142 p.
- 19 Baimbetov F.B., Davletov A.E., Kudyshev Zh.A. and Mukhametkarimov E.S. New Model of Dusty Plasma Particles Interaction // *Contrib. Plasma Phys.* – 2011. – Vol. 51. – P. 533.
- 20 Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Bastykova N.Kh. and Moldabekov Zh.A. Effect of dust particle polarization on scattering processes in complex plasmas // *Phys. Plasmas*. – 2015. – Vol 22. – 063703.
- 21 Antipov S.N., Schepers L.P.T., Vasiliev M.M. and Petrov O.F. Dynamic Behavior of Polydisperse Dust System in Cryogenic Gas Discharge Complex Plasmas: Dynamic Behavior of Polydisperse Dust System in Cryogenic Gas Discharge Complex Plasmas // *Contrib. Plasma Phys.* – 2016. – Vol. 56. – P. 296.
- 22 Polyakov D.N., Vasilyak L.M. and Shumova V.V. Transformation of dust structures in a dc discharge in neon // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2015. – Vol. 51. – P. 143.
- 23 Sekine W. and Ishihara O. Coulomb cluster in a plasma under cryogenic environment // *J. Plasma Fusion Res. SERIES*. – 2009. – Vol. 9. – P. 0416.
- 24 Kubota J., Kojima Ch., Sekine W., and Ishihara O. Coulomb cluster in a plasma under cryogenic environment // *J. Plasma Fusion Res.* – 2009, Ser. 8. – P.0286.
- 25 Landau L.D. and Lifshitz U.M. *Theory of Fields*. – M: Phymathlit, 2003. – 65 p.
- 26 Khrapak S.A., Ivlev A.V. and Morfill G. Momentum transfer in complex plasmas // *Phys. Rev. E*. – 2004. – Vol. 70. – P. 056405.

### References

- 1 G. Wattieaux and L. Boufendi, *Phys. Plasmas* 19, 033701, (2012).
- 2 G. Wattieaux, Abdelaziz Mezeghrane and L. Boufendi, *Phys. Plasmas* 18, 093701 (2011).
- 3 Y.A. Ussenov, T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova and M.K. Dosbolayev, *EPL* 105, 15002 (2014).
- 4 S.A. Orazbayev, M.M. Muratov, T.S. Ramazanov, M.K. Dosbolayev, M. Silamiya, M. N. Jumagulov and L. Boufendi, *Contrib. Plasma Phys.* 53, 5 (2013).
- 5 S.A. Maiorov, S.K. Kodanova, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov, R.I. Golyatina, N.Kh. Bastykova and A.U. Utegenov, *Physics of Plasmas* 22, 033705 (2015).



- 6 R.A. Quinn and J. Goree, *Phys. Plasmas* 7, 10 (2000).
- 7 M. Bonitz, C. Henning and D. Block, *Rep. Prog. Phys.* 73, 066501 (2010).
- 8 V.E. Fortov, O.F. Petrov, A.D. Usachev and A.V. Zobnin, *Physical Review E* 70, 046415 (2004).
- 9 S.K. Kodanova, N.Kh. Bastykova, T.S. Ramazanov and S.A. Maiorov, *IEEE Transactions on Plasma Science* 44, 525 (2016).
- 10 A.V. Fedoseev, G.I. Sukhinin, T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova and N.Kh. Bastykova, *Thermophysics and Aeromechanics* 18, 615 (2011).
- 11 S. Iwashita, E. Schngel, J. Schulze, P. Hartmann, Z. Donko, G. Uchida, K. Koga, M. Shiratani and U. Czarnetzki, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46, 245202 (2013).
- 12 G.I. Sukhinin and A.V. Fedoseev, *Phys. Rev. E* 81, 016402 (2010).
- 13 M.S. Barnes and et.al., *Phys. Rev. Lett.* 68, 313 (1992).
- 14 U. Konopka and et.al., *Phys. Rev. E* 61, 1890 (2000).
- 15 S.A. Trigger, *Phys. Rev. E* 67, 046403 (2003).
- 16 N. D'Angelo, *Phys. Plasmas* 5, 3155 (1998).
- 17 A.V. Fedoseev, G.I. Sukhinin, M.K. Dosbolayev and T.S. Ramazanov, *Phys. Rev. E* 92, 023106 (2015).
- 18 J. Jackson, *Classical electrodynamics*, (Wiley, 1999), p.142.
- 19 F.B. Baimbetov, A.E. Davletov, Zh.A. Kudyshev and E.S. Mukhametkarimov, *Contrib. Plasma Phys.* 51, 533 (2011).
- 20 S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, N.Kh. Bastykova and Zh.A. Moldabekov, *Phys. Plasmas* 22, 063703 (2015).
- 21 S.N. Antipov, L.P.T. Schepers, M.M. Vasiliev and O.F. Petrov, *Contrib. Plasma Phys.* 56, 296 (2016).
- 22 D.N. Polyakov, L.M. Vasilyak and V.V. Shumova, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 51, 143 (2015).
- 23 W. Sekine and O. Ishihara, *J. Plasma Fusion Res. SERIES* 9, 0416 (2009).
- 24 J. Kubota, Ch. Kojima, W. Sekine and O. Ishihara, *J. Plasma Fusion Res. Ser.* 8, 0286 (2009).
- 25 L.D. Landau and U.M. Lifshitz, *Theory of Fields*, (Moscow, 2003), p.65.
- 26 S.A. Khrapak, A.V. Ivlev and G. Morfill, *Phys. Rev. E* 70, 056405 (2004).