

**Муратов М.М.^{1,2*}, Молдабеков Ж.А.^{2,3}, Алдакулов Е.²,
Рамазанов Т.С.², Темирбек А.М.²**

¹ННЛОТ, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

²НИИЭТФ, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

³Институт прикладных наук и информационных технологий, Казахстан, г. Алматы,

*e-mail: mukhit.muratov@gmail.com

ВЛИЯНИЕ СИЛЫ АТОМНОГО УВЛЕЧЕНИЯ НА ДИФФУЗИЮ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В КРИОГЕННОЙ ПЛАЗМЕ

В криогенных условиях сила атомного увлечения (термофоретическая сила) сильнее чем при комнатной температуре. Ранее была рассчитана разница температур между поверхностью пылевых частиц и окружающим газом. Эта разница была причиной проявления так называемой силы атомного увлечения между пылевыми частицами. В данной работе представлены результаты исследования, полученные с помощью моделирования методом молекулярной динамики – влияния силы атомного увлечения на среднее квадратичное смещение заряженных пылевых частиц в двумерном слое. Среднее квадратичное смещение характеризует диффузию частиц. С помощью изменения параметров, описывающих силу атомного увлечения, были определены случаи, когда данная сила приводит к значительным изменениям свойств криогенной комплексной плазмы. Также, приведены данные по компьютерному моделированию. Среднее квадратичное смещение рассчитывалось для разных значений параметра связи. Приведены соотношения кривых среднее квадратичного смещения с учетом и без силы атомного увлечения. Было обнаружено, что сила атомного увлечения может существенно влиять на диффузию пылевых частиц, если характерный радиус взаимодействия силы атомного увлечения превышает среднее расстояние между пылевыми частицами. Последний случай соответствует низким давлениям, $P < 1 \text{ Па}$, и криогенным температурам менее 10 К . Длина свободного пробега нейтралов определяет диапазон действия (радиус) силы атомного увлечения. Радиус действия силы атомного увлечения в зависимости от значения давления может быть, как больше, так и меньше, чем среднее расстояние между частицами. Для оценки влияния силы атомного увлечения, был выбран потенциал взаимодействия между пылевыми частицами. Были рассмотрены два случая с разными значениями радиуса обрезания. Показано что, сила атомного увлечения приводит к более сильному отталкиванию между пылевыми частицами при больших значениях радиуса обрезания. Обнаружено что, сила атомного увлечения с увеличением значения радиуса обрезания приводит к значительному отклонению кривых от данных полученных пренебрежением этой силы. С увеличением параметра связи отклонение становится более существенной из-за силы атомного увлечения.

Ключевые слова: пылевая плазма, криогенная плазма, сила атомного увлечения, среднее квадратичное смещение.

Muratov M.M.^{1,2*}, Moldabekov Zh.A.^{2,3}, Aldakulov E.²,
Ramazanov T.S.², Temirbek A.M.²

¹NNLOT, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

²IETP, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

³Institute of Applied Sciences and Information Technologies, Kazakhstan, Almaty,

*e-mail: mukhit.muratov@gmail.com

The effect of the thermophoretic force on diffusion of dust particles in cryogenic plasma

At cryogenic temperatures of atoms, the thermophoretic force (atomic drag force) is stronger than at room temperature. The temperature difference between the surface of the dust particles and the surrounding gas was previously evaluated. This difference was the reason of the manifestation of the so-called thermophoretic force between dust particles. This paper presents the results of a study obtained using molecular dynamics modeling of the effect of thermophoretic force on the mean-square displacement of charged dust particles in a two-dimensional layer. The mean-square displacement (MSD) characterizes the diffusion of particles. By changing parameters that describe thermophoretic force, there were identified cases when this force leads to significant changes in the properties of the cryogenic complex plasma. Also the data on computer simulation are provided. MSD was calculated for different values of the coupling parameter. The ratios MSD curves with and without thermophoretic force are given. It was found that the thermophoretic force can drastically influence the diffusion of dust particles if the characteristic interaction radius due to thermophoretic force exceeds the average distance between dust particles. The aforementioned effect can take place at low density of neutral and temperatures relevant to cryogenic conditions. The force with increasing value of cutoff radius causes deviation of the curves from data obtained on the basis neglecting thermophoretic force. Deviation becomes more visible, with increasing coupling parameter, due to the force.

Key words: dusty plasma, cryogenic plasma, thermophoretic force, mean-square displacement.

Муратов М.М.^{1,2*}, Молдабеков Ж.А.^{2,3}, Алдакулов Е.²,
Рамазанов Т.С.², Темірбек Ә.М.²

¹АТҮНЗ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

²ЭТФЭИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

³Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, Қазақстан, Алматы қ.,

*e-mail: mukhit.muratov@gmail.com

Криогендік плазмадағы тозаңды бөлшектердің диффузиясына термофоретикалық күштің әсері

Криогендік жағдайдағы термофореттік күш қалыпты бөлме температурасы жағдайына қарағанда күштірек болады. Тозаңды бөлшектер беті мен қоршаған газ арасындағы температураларының айырымдары бұдан бұрын есептелген болатын. Бұл айырым тозаңды бөлшектер арасындағы термофоретикалық күштің пайда болуының себебі болып табылады. Бұл жұмыста екі өлшемді қабаттағы зарядталған тозаңды бөлшектердің орташа квадраттық ығысуына термофоретикалық күштің әсерін молекулалық динамика әдісімен модельдеу арқылы арқылы алынған зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Орташа квадраттық ығысу бөлшектердің диффузиясын сипаттайды. Термофоретикалық күшті сипаттайтын параметрлерді өзгерту арқылы, осы күштің криогенді комплексті плазманың қасиеттерінің біршама өзгерісіне алып келетін жағдайлары анықталды. Сонымен қатар, компьютерлік модельдеудің мәліметтері келтірілген. Орташа квадраттық ығысу байланыс параметрінің әр түрлі мәндері үшін есептелінді. Термофоретикалық күшті ескерген және ескермеген жағдайдағы орташа квадраттық ығысу қисықтарының қатынастары алынған. Термофоретикалық күшке тән әсерлесу радиусы тозаңды бөлшектер арасындағы орташа арақашықтығынан көп болған жағдайда, термофоретикалық күштің тозаңды бөлшектердің диффузиясына айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Соңғы жағдай төмен қысымдар, $P < 1$ Па, және 10К төмен криогендік температураларға сәйкес келеді. Бейтараптардың еркін жүру жолы термофоретикалық күштің әсер ететін диапазонын (радиусын) анықтайды. Термофоретикалық күштің әсер ететін радиусын қысымның мәндеріне байланысты, бөлшектердің орташа арақашықтығынан үлкен де, кіші де болуы мүмкін. Термофоретикалық күштің әсерін есептеу үшін тозаңды бөлшектер арасындағы әсерлесу потенциалы таңдап алынды. Әр түрлі кесу радиустарының мәндерінің жағдайлары қарастырылды. Кесу радиустарының үлкен мәндері, термофоретикалық күш тозаңды бөлшектер арасындағы тебуінің күшеюіне алып келетіні көрсетілді. Термофоретикалық

күштің кесу радиусы мәнінің артуымен осы күшті ескермегендегі мәліметтермен салыстырғандағы мәндерінің елеулі түрде ауытқуына алып келетіні анықталды. Термофоретикалық күш үшін байланыс параметрінің өсуімен бұл ауытқуының әсері өседі.

Түйін сөздер: тозанды плазма, криогендік плазма, термофоретикалық күш, орташа квадраттық ығысу.

Введение

Пылевая плазма в стандартных газоразрядных экспериментах с нейтральными атомами при комнатной температуре были детально изучены в последнее десятилетие [1-3]. Эксперименты с пылевой плазмой проводились в космосе в условиях микрогравитации [4-6] и в криогенном газовом разряде [7-9] для изучения новых явлений. Пылевая плазма в криогенном газовом разряде вызвала интерес из-за возможности существования новых эффектов в такой экстремальной среде [10-12]. Одной из причин проведения экспериментов в криогенных условиях является получение двумерной системы пылевых частиц с наивысшим из когда-либо реализованных параметров связи [10-12]. Также существует прогноз возможного влияния квантовых эффектов на парное взаимодействие пылевых частиц [11].

В работе [13] было показано, что в криогенной среде поверхностная температура пылевой частицы почти в десять раз выше, чем у фонового газа (где температура последнего может быть всего 4,2 К). Данный эффект имеет место при давлениях 0,6-10 Па. При данных параметрах первый эксперимент был выполнен Ишихара и его коллегами [9] с частицами размером 0,4 мкм. Из-за большой разницы между температурой нейтральных частиц, находящихся вдали от пылевой частицы, и поверхностной температурой пылевой частицы, сила атомного увлечения может быть сравнима с экранированной силой кулоновского взаимодействия. В свободномолекулярном режиме масштаб длины силы атомного увлечения определяется длиной свободного пробега нейтральных частиц; например, в работе [9] l больше, чем среднее расстояние между частицами при 0,6 Па. Следовательно, сила атомного взаимодействия может быть очень важным при параметрах криогенной пылевой плазмы, и необходимо изучить возможные эффекты, связанные с этой силой.

Отметим, что наши знания о комплексной плазме в криогенной среде вряд ли можно охарактеризовать как обширные. На самом деле физические свойства криогенного газового

разряда в значительной степени неизвестны. Следовательно, вместо того, чтобы пытаться придерживаться каких-то конкретных параметров газового разряда, мы меняем параметры, описывающие силу атомного увлечения, и пытаемся определить случай, когда данная сила приводит к значительным изменениям.

В разделе II приведены подробности о параметрах моделирования. Результаты обсуждаются в разделе III, а обобщение (выводы) дается в разделе IV.

Метод моделирования

Разница температур между поверхностью пылевых частиц и окружающим газом приводит к проявлению так называемой силы атомного увлечения между частицами пыли [14]

$$U_n(R; T_n, T_s) = \frac{C}{R}, \quad (1)$$

где $C = (3\pi/8)(a^3 p)(\Delta T / T_n)$, a – радиус пылевых частиц, R – расстояние между двумя пылевыми частицами в единицах a , P – давление газа, $\Delta T = T_s - T_n$ – разница между температурой поверхности пылевой частицы и температурой нейтральных частиц, расположенных на расстоянии (вдали) от пылевых частиц; ΔT рассчитывается с учетом нагрева за счет рекомбинации ионов с электронами на поверхности пылевой частицы, охлаждения за счет излучения и потока нейтралов с поверхности пылевой частицы [15]. В работе [13] путем исследования ΔT было установлено, что в криогенных условиях сила атомного увлечения (1) не зависит от давления газа. Однако, длина свободного пробега l атомов зависит от величины давления. Как упоминалось выше, длина свободного пробега нейтралов определяет диапазон действия (радиус) силы атомного увлечения. При низких давлениях радиус действия силы атомного увлечения может принимать значение, как больше (при 0,6 Па), так и меньше (при 10 Па), чем среднее расстояние между частицами. Чтобы оценить влияние силы

атомного увлечения, мы используем следующую форму взаимодействия между пылевыми частицами:

$$\frac{V(R)}{k_B T_d} = \frac{\Gamma}{R} \exp(-Rk_s) + \frac{\alpha}{R}, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \begin{cases} \frac{C}{k_b T_d} & \text{if } R \leq l/a \\ 0 & \text{if } R > l/a \end{cases}. \quad (3)$$

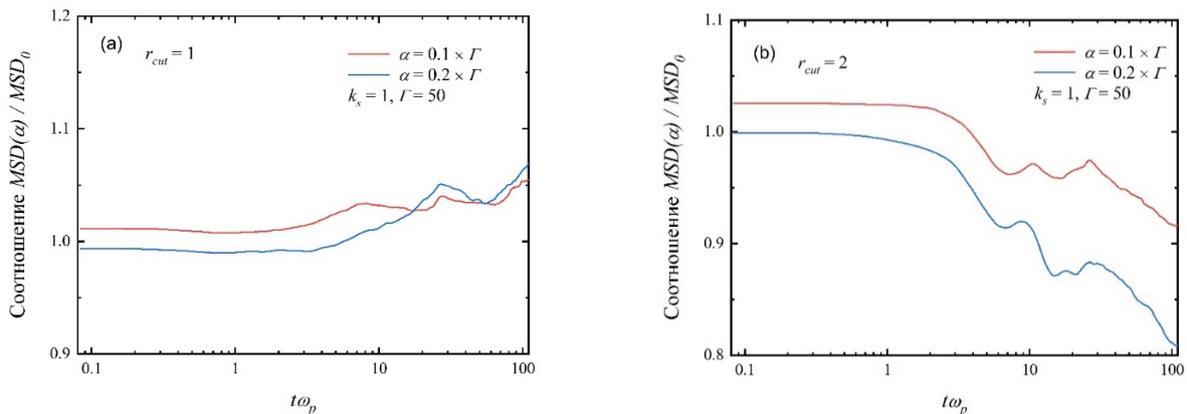
Определим радиус обрезания как $r_{cut}=l/a$, и рассмотрим два случая $r_{cut}=1$ и $r_{cut}=2$. В работе [13] было показано, что при криогенных условиях α может изменяться в диапазоне от $\alpha = \Gamma$ до $\alpha = (0.1)^2 \Gamma$. В этой работе мы рассмотрим $\alpha = 0.1\Gamma, 0.2\Gamma$. Случай при отсутствии силы атомного увлечения указывается как $\alpha = 0$. Сила атомного увлечения приводит к более сильному отталкиванию между пылевыми частицами при $R \leq r_{cut}$. В данной работе параметр экранирования k_s в потенциале (2) принимается равным единице. Среднеквадратичное смещение вычисляется с помощью метода молекулярной динамики (MD) для двумерной системы пылевых частиц, взаимодействующих через потенциал (2). Мы использовали периодическое граничное условие. Количество пылевых частиц состав-

ляло 2000. Подробности об используемой программе MD и проверке моделирования путем сравнения с результатами других авторов были показаны в работах [16-18].

Результаты и обсуждения

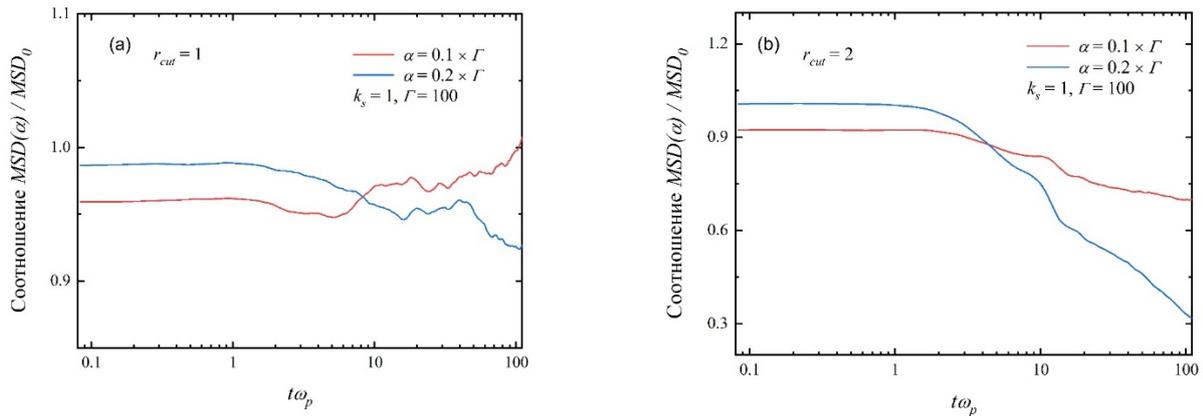
На рисунках 1-3 показаны соотношения среднеквадратичного смещение при $\Gamma = 50, 100, 150$. Где MSD_0 – среднеквадратичного смещение при $\alpha = 0$. Общей чертой данных рисунков является то, что в случае $r_{cut}=1$ (верхняя граница) среднеквадратичного смещение практически не изменяется из-за силы атомного увлечения. Напротив, при $r_{cut}=2$ сила атомного увлечения приводит к значительному отклонению кривых от данных полученных пренебрежением силы атомного увлечения. С увеличением параметра связи это отклонение становится более существенной из-за силы атомного увлечения (обратите внимание, что отношение α/Γ оставалось постоянным).

Значение $r_{cut}=2$ при температуре нейтралов в диапазоне $4.2K \leq T_n \leq 10K$ соответствует давлению $P < 1 \text{ Па}$. При этом значении давления α сравнимо с параметром Γ [13]. Таким образом, результаты моделирования показывают, что сила атомного увлечения может оказывать сильное влияние на динамические свойства пылевых частиц при низких значениях давления криогенного газового разряда.



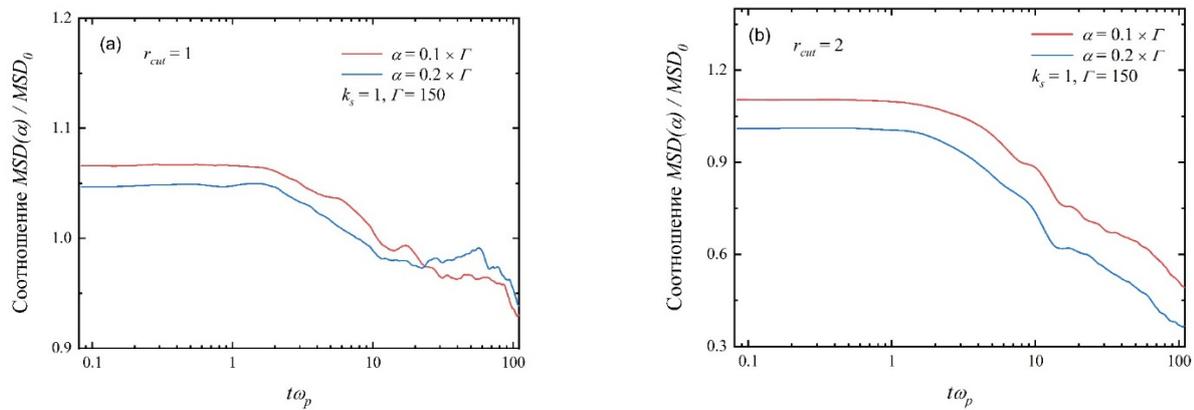
а) случай с $r_{cut} = 1$; (б) случай с $r_{cut} = 2$. r_{cut} определяет радиус действия силы атомного увлечения.

Рисунок 1 – Соотношения среднеквадратичного смещение пылевых частиц при $\Gamma = 50$



(а) случай с $r_{cut} = 1$; (б) случай с $r_{cut} = 2$. r_{cut} определяет радиус действия силы атомного увлечения

Рисунок 2 – Соотношения среднеквадратичного смещение пылевых частиц при $\Gamma = 100$



(а) случай с $r_{cut} = 1$; (б) случай с $r_{cut} = 2$. r_{cut} определяет радиус действия силы атомного увлечения

Рисунок 3 – Соотношения среднеквадратичного смещение пылевых частиц при $\Gamma = 150$

Выводы

Экспериментальное исследование комплексной плазмы в криогенных условиях только началось. Пылевые частицы в таких системах могут иметь ряд особенностей, которые отсутствуют в экспериментах с нейтралами приблизительно при комнатной температуре. Наши расчеты показывают, что в криогенных условиях, сила атомного взаимодействия может оказать существенное влияние на динамические свойства при низких значениях давления газа, $P < 1$ Па.

Очевидно, что криогенные эксперименты сложнее реализовать по сравнению с экспери-

ментами, проводимыми в обычных условиях. Тем не менее, мы считаем, что дальнейшее экспериментальное и теоретическое изучение такого экзотического состояния, как криогенная комплексная плазма, может привести к открытию новых интересных явлений (феноменов).

Благодарность

Работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан по программно-целевому финансированию №BR05236730, «Исследование фундаментальных проблем физики плазмы и плазмоподобных сред».

Литература

- 1 Ludwig P., Jung H., Kaehlert H., Joost J.-P., Greiner F., Moldabekov Zh., Carstensen J., Sundar S., Bonitz M., Piel A. Non-Maxwellian and magnetic field effects in complex plasmas // *Europ. Phys. J. D.* – 2018. – Vol.72. – P.82.
- 2 Kaehlert H., Melzer A., Puttscher M., Ott T., Bonitz M. Magnetic field effects and waves in complex plasmas // *Europ. Phys. J. D.* – 2018. – Vol. 72. – P.83.
- 3 Ott T., Thomsen H., Abraham J. W., Dornheim T., Bonitz M. Recent progress in the theory and simulation of strongly correlated plasmas: phase transitions, transport, quantum, and magnetic field effects // *Europ. Phys. J. D.* – 2018. – Vol. 72. – P.84.
- 4 Fortov V. The project of Plasmakristall-4 (PK-4) – a new stage in investigation of dusty plasmas under microgravity conditions: first results and future plans // *Plasma Phys. Control. Fusion.* – 2005. – Vol. 47. – P. 537.
- 5 Ramazanov T.S. Experimental investigations of strongly coupled Coulomb system of diamagnetic dust particles in a magnetic trap under microgravity conditions // *EPL.* – 2016. – Vol. 116. – P. 45001.
- 6 Dyechkov L. Structure of a Coulomb cluster in the cusp magnetic trap under microgravity conditions // *Contrib. Plasma Phys.* – 2018. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201700103>.
- 7 Antipov S. N., Asinovskii E. I., Fortov V. E., Kirillin A. V., Markovets V. V., Petrov O. F., Platonov V. I. Dust structures in cryogenic gas discharges // *Phys. Plasmas.* – 2007. – Vol. 14. – P. 090701.
- 8 Antipov S. N., Asinovskii E. I., Kirillin A. V., Maiorov S. A., Markovets V. V., Petrov O. F., V. Fortov E. Charge and structure of dust particles in a gas discharge at cryogenic temperatures // *JETP.* – 2008. – Vol. 106. – P. 830.
- 9 Kubota J., Kojima Ch., Sekine W., Ishihara O. Coulomb cluster in a plasma under cryogenic environment. – *J. Plasma Fusion Res. Ser.* – 2009. – vol. 8. – P. 0286.
- 10 Rosenberg M., Kalman G. J. Suggestion for a two-dimensional cryogenic complex plasma. – *Europhys.Lett.* – 2006. – Vol. 75. – P. 894.
- 11 Ishihara O. Multifacets of dusty plasmas, complex plasma research under extreme conditions. – *AIP Conf. Ser.* – 2008. – Vol. 1041. – P. 139.
- 12 Polyakov D. N., Vasilyak L. M., Shumova V. V. Synergetics of dusty plasma and technological aspects of the application of cryogenic dusty plasma. – *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* – 2015. – Vol. 51. – P.143.
- 13 Ramazanov T.S., Moldabekov Z., Muratov M. Grain surface heating in cryogenic environment // *Phys. Plasmas.* – 2017. – Vol. 24. – P. 050701.
- 14 Tsytoich V.N., Khodataev Ya. K., Morfill G.E., Bingham R., Winter J. Radiative dust cooling and dust agglomeration in plasmas // *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion.* – 1998. – Vol. 18. – P. 281.
- 15 Khrapak S.A., Morfill G.E. Grain surface temperature in noble gas discharge: Refined analytical model // *Phys. Plasmas.* – 2006. – Vol. 13. – P. 104506.
- 16 Ramazanov T.S., Gabdulin A. Zh., Moldabekov Zh.A. Effect of dipole-dipole interaction on the compressional oscillations in two-dimensional Yukawa liquids // *Contrib. Plasma Phys.* – 2016. – Vol. 56. – P.391.
- 17 Ramazanov T.S., Gabdulin A. Zh., Moldabekov Zh.A. MD simulation of charged dust particles with dipole moments // *IEEE Trans. PlasmaSci.* – 2015. – Vol. 43. – P.4187.
- 18 Ramazanov T.S., Gabdulin A. Zh., Moldabekov Zh.A. Sound speed and diffusion in 2D Yukawa liquids // *Contrib. Plasma Phys.* – 2017. – Vol. 57. – P.458.
- 19 Thomas E., Lynch B., Konopka U., Merlino R.L., Rosenberg M. Observations of imposed ordered structures in a dusty plasma at high magnetic field // *Phys. Plasmas.* – 2015. – Vol. 22. – P.030701.
- 20 Sundar S. Wake effects of a stationary charged grain in streaming magnetized ions // *Phys. Rev. E.* – 2018. – Vol 98. – P.023206.

References

- 1 P. Ludwig, H. Jung, H. Kaehlert, J.-P. Joost, F. Greiner, Z. Moldabekov, J. Carstensen, S. Sundar, M. Bonitz, A. Piel, *Europ.Phys. J. D.*, 72, 82 (2018).
- 2 H. Kaehlert, A. Melzer, M. Puttscher, T. Ott, M. Bonitz, *Europ. Phys. J. D.*, 72:83 (2018).
- 3 T. Ott, H. Thomsen, J. W. Abraham, T. Dornheim, M. Bonitz, *Europ. Phys. J. D.*, 72: 84 (2018).
- 4 V. Fortov, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 47, B537 (2005).
- 5 T.S. Ramazanov, *EPL*, 116, 45001 (2016).
- 6 L. Dyechkov, *Contrib. Plasma Phys.*, <https://doi.org/10.1002/ctpp.201700103> (2018).
- 7 S. N. Antipov, E. I. Asinovskii, V. E. Fortov, A. V. Kirillin, V. V. Markovets, O. F. Petrov, V. I. Platonov, *Phys. Plasmas*, 14, 090701 (2007).
- 8 S. N. Antipov, E. I. Asinovskii, A. V. Kirillin, S. A. Maiorov, V. V. Markovets, O. F. Petrov, V. E. Fortov, *JETP*, 106, 830 (2008).
- 9 J. Kubota, Ch. Kojima, W. Sekine, O. Ishihara, *J. Plasma Fusion Res. Ser.*, 8, 0286 (2009).
- 10 M. Rosenberg and G. J. Kalman, *Europhys.Lett.*, 75, 894 (2006).
- 11 O. Ishihara, *AIP Conf. Ser.*, 1041, 139 (2008).
- 12 D. N. Polyakov, L. M. Vasilyak, and V. V. Shumova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 51, 143 (2015).
- 13 T.S. Ramazanov, Z. Moldabekov, M. Muratov, *Phys. Plasmas*, 24, 050701 (2017).
- 14 V.N. Tsytoich, Ya. K. Khodataev, G.E. Morfill, R. Bingham, and J. Winter, *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion*, 18, 281 (1998).
- 15 S.A. Khrapak, and G.E. Morfill, *Phys. Plasmas*, 13, 104506 (2006).
- 16 T.S. Ramazanov, A. Zh. Gabdulin, Zh.A. Moldabekov, *Contrib. Plasma Phys.*, 56, 391 (2016).
- 17 T.S. Ramazanov, A. Zh. Gabdulin, Zh.A. Moldabekov, *IEEE Trans. PlasmaSci.*, 43, 4187 (2015).
- 18 T.S. Ramazanov, A. Zh. Gabdulin, Zh.A. Moldabekov, *Contrib. Plasma Phys.*, 57, 458 (2017).
- 19 E. Thomas, B. Lynch, U. Konopka, R. L. Merlino, and M. Rosenberg, *Phys. Plasmas*, 22, 030701 (2015).
- 20 S. Sundar, *Phys. Rev. E*, 98, 023206 (2018).