

Бастыкова Н.Х., Коданова С.К.,
Рамазанов Т.С., Донко З.

**Манипуляция пылевыми
частицами
в комбинированном
RF + DC разряде**

В данной работе проведены эксперимент и кинетическое моделирование на основе метода частиц в ячейках для получения равновесного положения пылевых частиц в комбинированном высокочастотном разряде при наложении постоянного тока. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными. Получено общее хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений высоты левитации пылевого слоя для всех наборов данных при различных давлениях газа и межэлектродной длины. Это, в свою очередь, подтверждает, что данная модель и его реализация в коде, а также балансовые модели зарядки и силы, достаточно хорошо описывают плазму и пылевую систему. Результаты показывают, что внешние смещения постоянного напряжения обеспечивают прочный контроль над положением пылевого слоя.

Ключевые слова: пылевая плазма, высокочастотный разряд, метод частиц в ячейках, метод Монте-Карло.

Bastykova N.Kh., Kodanova S.K.,
Ramazanov T.S., Donko Z.

**Manipulation of dust particles in
RF + DC discharge**

In this study, we conducted experiments and kinetic modeling on the basis of particle-in-cell method to obtain the equilibrium position of the dust particles in the combined radio-frequency discharge upon application of DC. The calculation results are compared with experimental data. A general good agreement between experimental and calculated values for the levitation height of all data sets at different gas pressures and inter electrode length. This agreement confirms that the simulation method, as well as the charging and force balance models adopted in the work describe the plasma and dust system considerably well. The results show that the external DC bias provides control over the position of the dust layer.

Key words: dusty plasma, radiofrequency discharge, particle in cell method, Monte-Carlo method.

Бастықова Н.Х., Қоданова С.К.,
Рамазанов Т.С., Донко З.

**Біріккен RF + DC разрядта
тозаңды бөлшектерді басқару**

Бұл жұмыста тұрақты тоқты ендіруімен біріккен жоғарғыжиілікті разрядта тозаңды бөлшектердің тепе-теңдік орнын алу үшін ұяшықтардағы бөлшектер әдісімен кинетикалық моделдеу және эксперимент жүргізілді. Есептеу нәтижелері эксперимент деректерімен салыстырылды. Әртүрлі газ қысымы мен электродтар арасындағы арақашықтықтарда тозаңды бөлшектің орнықтылығының биіктігі эксперимент және есептеу нәтижелерімен жалпы жақсы келісімге ие. Бұл, негізінен берілген модель мен оның кодта орындалуын, және де күштер мен зарядталудың баланстық моделдері плазманы және тозаңды жүйені жеткілікті түрде жақсы сипаттайтынын дәлелдейді. Сыртқы тұрақты токтың ығысуы тозаңды бөлшектерді бақылауды қамтамасыз ететіні көрсетілді.

Түйін сөздер: тозаңды плазма, жоғарғы жиілікті разряд, ұяшықтардағы бөлшектер әдісі, Монте-Карло әдісі.

¹НИИЭТФ, Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы

²Институт физики твердого тела и оптики НИЦ физики им. Вигнера,
Будапешт, Венгрия

*E-mail: bastykova_nuriya@physics.kz

МАНИПУЛЯЦИЯ ПЫЛЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ В КОМ- БИНИРОВАННОМ RF + DC РАЗРЯДЕ

Введение

В плазме газового разряда регулярно генерируется слой пылевых частиц и многие их свойства (структуру, фазовые переходы, коллективные возбуждения и транспортные свойства) тщательно исследованы. При определенных условиях можно левитировать одним слоем пылевых частиц, положение которого определяется балансом сил, действующих на частицы. Это равновесное положение может быть достигнуто путем изменения характеристик плазмы, которые окружают частицу и представляются в качестве источника зарядки пылевых частиц [1-4].

Положение пылевого слоя может быть легко определено экспериментально с помощью визуального наблюдения системы. Параллельно с экспериментами теоретические модели зарядки пылевых частиц в сочетании с моделью разряда позволяют вычислить положение пылевой частицы. Цель данной работы заключается в том, чтобы изучить обоснованность такой модели для измерения и вычисления положения пылевого слоя в высокочастотном (ВЧ) разряде в присутствии дополнительного постоянного тока, что позволит манипулировать положением пылевых частиц.

Эксперимент

Параллельно с теоретическими расчетами авторами работ [13] были проведены эксперименты на горизонтально расположенных, двух плоских алюминиевых электродах диаметром $D = 170$ мм и расстоянием между ними $L = 55$ мм, расположенных внутри стеклянного цилиндра. В эксперименте были использованы меламиноформальдегидные сферические микрочастицы радиусом $r_d = 2,19 \mu\text{м}$. Облако частиц освещается через боковое окно с вертикально направленным светом (от 532 нм, 200 мВт) лазерного источника. Высота равновесного положения пылевого слоя была определена из записанных фотоизображений во время выполнения эксперимента (смотрите рисунки 1-2). Также, во избежание поверхностных процессов между электродом и плазмой, которые могут вызвать нелокальные эффекты, был проведен эксперимент на электродах из нержавеющей стали при высоких давлениях газа [14].



Рисунок 1 – Фотоизображения пылевого слоя во время эксперимента при постоянном напряжении $V_{DC}=0$ В

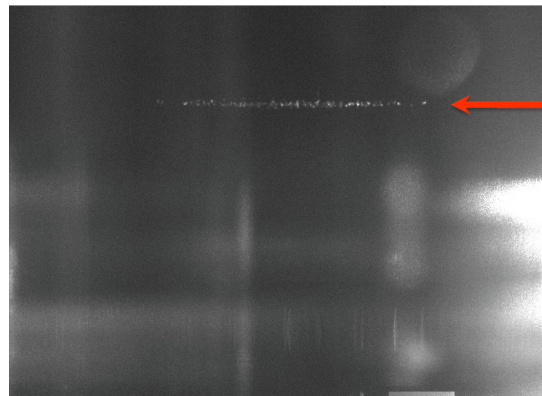


Рисунок 2 – Фотоизображения пылевого слоя во время эксперимента при постоянном напряжении $V_{DC}=-100$ В

PIC/MCC моделирование

Модель описывается методом частиц в ячейках, включающей и метод Монте-Карло, который учитывает процессы столкновения (PIC/MCC) [5-7]. Также учитываются взаимодействия заряженных частиц с поверхностью электродов при таких процессах как вторично-электронная эмиссия и отражение электронов от поверхности. Модель является одномерной (пространственной) задачей и рассматривает $2 \cdot 10^5$ суперчастиц, представляющих собой электроны и ионы аргона. Предполагается, что плотность пылевых частиц очень мала, т.е. наличие пылевых частиц не имеет никакого влияния на характеристики разряда. Этот подход, хотя он не отличается полной самосогласованностью, позволяет избежать проблемы, которые возникают из-за совершенно разного временного масштаба движения электронов, ионов и пылевых частиц [8,9].

Основная цель моделирования заключается в определении положения x_d пылевого слоя в плазме. Мы полагаем, что это положение, находится в непосредственной близости от оболочки/объемной границы выше нижнего электрода, которое определяется балансом вертикальных сил, действующих на пылевые частицы (при этом пренебрегаем взаимодействием между пылевыми частицами, вследствие более низкой плотности пылевых частиц, таким образом, будут важны только вертикальные силы). Рассмотрим следующие три силы, которые будут иметь значение при проведении наших исследований: силу тяжести, электростатическую силу и силу ионного увлечения.

Сила тяжести задается как:

$$F_g = m_d g, \quad (1)$$

где, m_d – масса пылевой частицы.

Электростатическая сила определяется следующим образом:

$$F_{el} = \langle E(x) \rangle q_d, \quad (2)$$

здесь $\langle E(x) \rangle$ – это усредненное по времени электрическое поле в положении x (получено из PIC/MCC моделирования разряда без пылевых частиц) и q_d является зарядом пылевой частицы.

Для расчета данной силы нужно определить заряд q_d пылевой частицы. Для этого, первым шагом вычисляем плавающий потенциал ϕ_d пылевой частицы. Для определения плавающего потенциала применяем метод [10], который основан на взаимодействии (столкновении) электронов и ионов с пылевыми частицами, описываемыми сечениями, которые соответствуют приближению OML-теории. Мы предполагаем, что при моделировании пылевые частицы находятся в каждой точке сетки (x_k) и выполняем расчеты для плавающего потенциала во всех узлах сетки. Это нужно только для определения одной из сил, F_{el} , как функцию x , и, наконец, реальное положение пылевого слоя будет определяться балансом трех сил, перечисленных выше. Плавающий потенциал ϕ_d пылевой частицы рассчитывается следующим образом: запускается PIC/MCC моделирование высокочастотного разряда для одного цикла, а между тем вычисляются потоки электронов и ионов на пылевую частицу (Γ_e

и Γ_i), путем суммирования всех электронов и ионов, соответственно:

$$\Gamma_e \propto \sum_p W_e v_p \sigma_{ed}[\varepsilon_p, \varphi_d(x_k)], \quad (3)$$

$$\Gamma_i \propto \sum_p W_i v_p \sigma_{id}[\varepsilon_p, \varphi_d(x_k)], \quad (4)$$

где W означает вес суперчастицы, v_p это скорость p -й электрона или иона, σ_{ed} и σ_{id} являются сечениями поглощения электронов и ионов пылевой частицей, соответственно [11].

Плавающий потенциал пылевых частиц находится итеративно, в соответствии с требованием, что уравнения (3) и (4) становятся равными в стационарном состоянии, на всех узлах сетки. $\varphi_d(x_k)$ меняется по $0,05$ В после каждого цикла моделирования в каждом узле сетки, чтобы достичь вышеуказанного требования.

Получив $\varphi_d(x_k)$, вычисляем заряд пылевой частицы, который извлекается из простой модели конденсатора:

$$q_d = 4\pi\varepsilon_0 a \varphi_d(x_k). \quad (5)$$

Из этой известной величины заряда пылевой частицы вычисляется электростатическая сила с пространственной зависимостью $F_{el}(x)$.

Сила ионного увлечения. Эта сила является результатом передачи импульса от ионов к пылевой частице [12] и состоит из двух частей: (I) из ионов, поглощенных пылевыми частицами, и (II) ионов, отраженных от заряженных пылевых

частиц. Эти две соответствующие компоненты силы называются силой поглощения и орбитальной силой:

$$F_i(x) = F_{i, coll}(x) + F_{i, orb}(x). \quad (6)$$

Распространенным способом учета этих процессов является принятие бинарной модели для столкновений. Перейдем к расчету по модели [12]. Необходимые данные могут быть (дрейфовые и средние скорости ионов) легко получены из расчетов моделирования PIC/MCC.

Наконец равновесное положение пылевых частиц определяется из баланса следующих сил:

$$F_{tot} = F_{el}(x_d) - F_g + F_i(x_d) = 0. \quad (7)$$

На рисунке 3(а) – 3(б) показаны пространственно-временные распределения плотности электронов, полученные из PIC/MCC моделирования, для $V_{pp} = 150$ В, при давлении $p = 10$ Па для случаев, когда постоянное напряжение $V_{dc} = 0$ В и $V_{dc} = -90$ В. При нулевом смещении (рисунок 3 (а)) пик плотности электронов располагается в центре разряда, а длины слоев равны на обеих сторонах электрода. Накладываемое отрицательное смещение V_{dc} сдвигает пик плотности электронов в направлении заземленного электрода и увеличивает длину при электродного слоя вблизи электрода с высокочастотным нагревом, как показано на рисунке 3(б). Сдвиг пика плотности электронов также сопровождается уменьшением плотности электронов в нулевых смещениях.

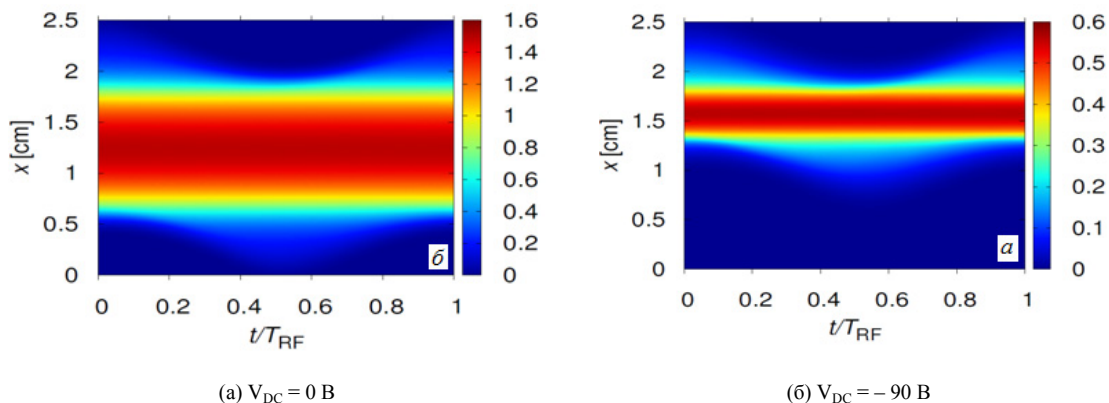


Рисунок 3 – Влияние постоянного напряжения V_{dc} на пространственно-временное распределение плотности электронов для $L = 25$ мм, $V_{pp} = 150$ В при давлении $p = 10$ Па. Цветовые масштабы приведены в единицах 10^9 см⁻³

Далее на рисунках 4(а)- 4(б) показаны пространственные зависимости различных силовых компонентов (гравитационной, электрической и силы ионного увлечения) для следующих условий: $V_{pp} = 150 \text{ В}$, при давлении $p = 10 \text{ Па}$, при постоянном напряжении: $V_{dc} = 0 \text{ В}$ и $V_{dc} = -90 \text{ В}$. Среди компонентов силы ионного увлечения видно, что орбитальная сила ионного увлечения является доминирующей по сравнению с силой поглощения ионами. Как видно из рисунка 4 (а), равновесное положение пылевого слоя при постоянном напряжении $V_{DC} = 0 \text{ В}$ находится на расстоянии $x_d = 0,58 \text{ см}$, где суммарное значение всех действующих сил на пылинку равно нулю. Когда отрицательное смещение постоянного напряжения ($V_{DC} = -90 \text{ В}$) прикладывается к плазме, высота левитации существенно увеличивается и смещается на $x_d = 1,26 \text{ см}$ вместе с длиной слоя на электроде с питанием. Было установлено, что плавающий потенциал и заряд пылевых частиц на высоте левитации соответственно равны $\phi_d \approx -7 \text{ В}$ и $q_d \approx -10800 \text{ е}$.

В эксперименте, а также в моделировании исследованы смещения постоянного напряжения в

широком диапазоне (при различных давлениях газа и межэлектродных расстояниях), в диапазоне постоянного напряжения $-100 \text{ В} \leq V_{DC} \leq 100 \text{ В}$. Результаты экспериментов, проведенных при различных давлениях газа, приведены на рисунках 5-6. Кривые, полученные при различных значениях давления и межэлектродного расстояния, имеют ту же тенденцию. При постоянном напряжении $V_{DC} = 0 \text{ В}$ и фиксированной длине промежутка высота левитации (x_d) уменьшается с увеличением давления за счет уменьшения длины слоя. Большое расстояние между электродами, при фиксированном давлении, приводит к незначительному снижению высоты пылевого слоя x_d . Отрицательное напряжение на электроде с ВЧ нагревом приводит к увеличению высоты пылевого слоя и во всех случаях, эта позиция монотонно возрастает с уклоном. Таким образом, высота пылевого слоя x_d может быть настроена на коэффициент от 2 до 3, в абсолютных числах, вплоть до 9 мм , в случае $p = 5,6 \text{ Па}$ и $L = 36 \text{ мм}$. Положительные значения смещения постоянного напряжения имеют незначительное влияние на x_d , как это можно увидеть на рисунках 5-6.

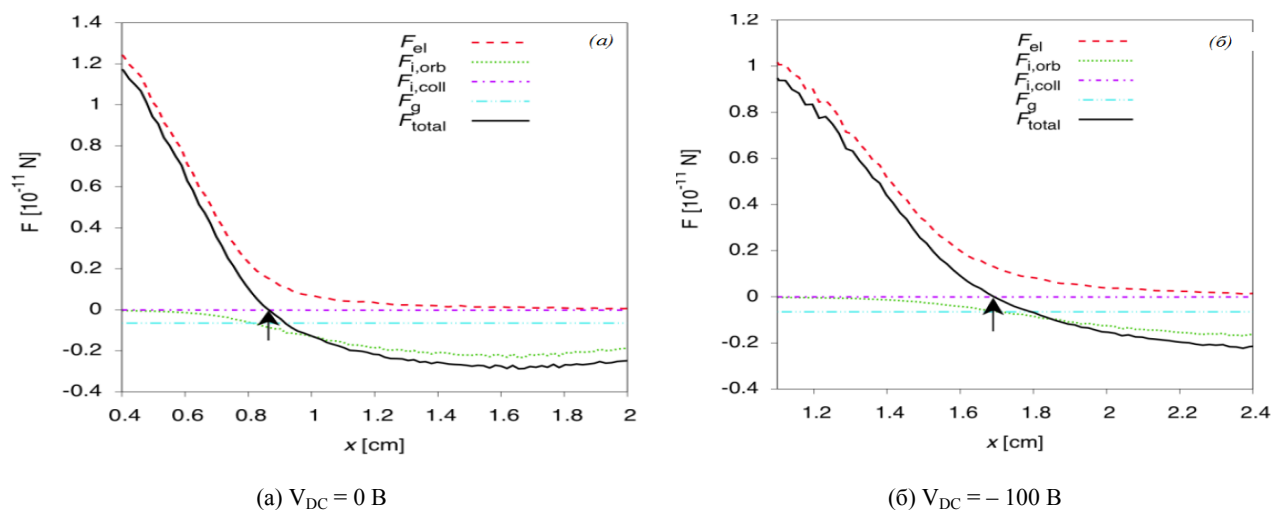
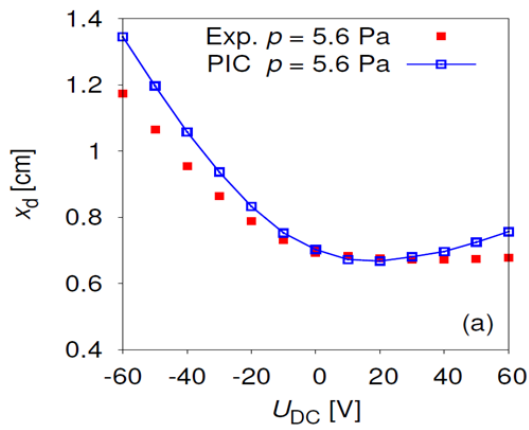
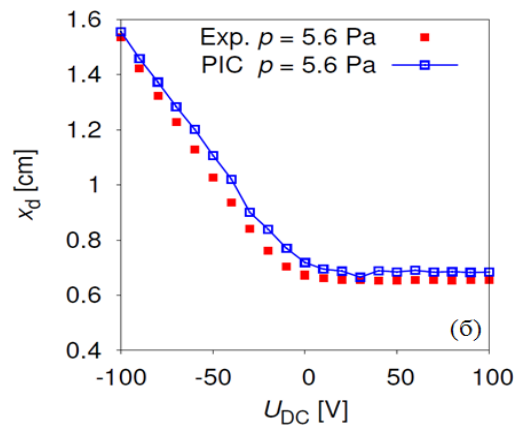


Рисунок 4 – Пространственное распределение компонентов сил, действующих на пылевую частицу для $V_{pp} = 200 \text{ В}$ при давлении $p = 1,8 \text{ Па}$.

Стрелки указывают на равновесное положение пылевых частиц для соответствующих условий

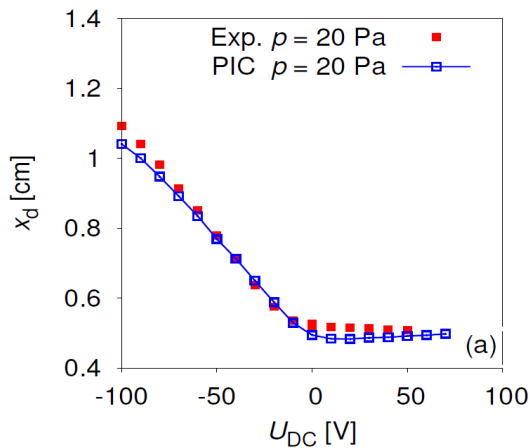


(a) $L = 25$ мм

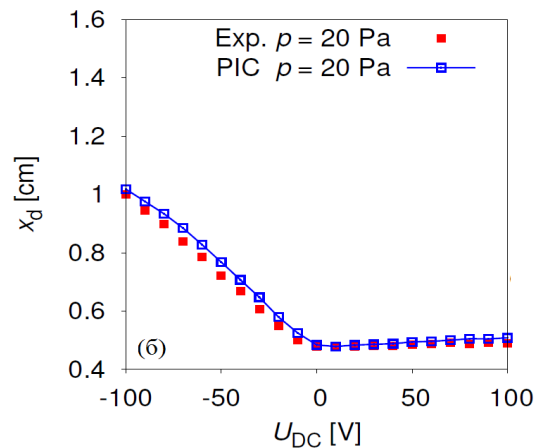


(б) $L = 36$ мм

Рисунок 5 – Равновесное положение пылевого слоя в зависимости от постоянного напряжения, для условий $V_{pp} = 150$ В, при $p = 5,6$ Па



(a) $L = 25$ мм



(б) $L = 36$ мм

Рисунок 6 – Равновесное положение пылевого слоя в зависимости от постоянного напряжения, для условий $V_{pp} = 150$ В, при $p = 20$ Па

Заключение

В данной работе исследованы свойства плазмы и пылевой системы в высокочастотном разряде в присутствии дополнительного постоянного тока. Проведены эксперименты и кинетическое моделирование для измерения и вычисления положения пылевого слоя в высокочастотном (ВЧ) разряде в присутствии дополнительного постоянного тока, что позволит манипулировать положением пылевых частиц. Получено

общее хорошее согласие экспериментальных и расчетных значений высоты левитации пылевого слоя. Это, в свою очередь, подтверждает, что данная модель и его реализация в коде, а также балансовые модели зарядки и силы, достаточно хорошо описывают плазму и пылевую систему, и что они могут быть применимы для диапазона условий, охватываемых здесь. Результаты показывают, что внешние смещения постоянного напряжения обеспечивают прочный контроль над положением пылевого слоя.

Литература

- 1 Nosenko V., Goree J., Piel A. Laser Method Of Heating Monolayer Dusty Plasmas // *Phys. Plasmas*. – 2006. – Vol. 13. – P. 032106.
- 2 Nosenko V., Ivlev A.V., Morfill G.E. Laser-induced rocket force on a microparticle in a complex (dusty) plasma // *Phys. Plasmas*. – 2010. – Vol. 17. – P. 123705-123706.
- 3 Iwashita S., Schüngel E., Schulze J., Hartmann P., Donko Z., Uchida G., Koga K., Shiratani M., Czarnetzki U. Transport control of dust particles via the electrical asymmetry effect: experiment, simulation and modelling // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 46. – P. 245202.
- 4 Birdsall C. K. Particle-in-cell charged-particle simulations, plus Monte Carlo collisions with neutral atoms, PIC-MCC // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 1991. – Vol. 19. – P. 65-85.
- 5 Matyash K., Schneider R., Taccogna F., Hatayama A., Longo S., Capitelli M., Tskhakaya D., Bronold F.X. Particle in Cell Simulation of Low Temperature Laboratory Plasmas // *Contrib. Plasma Phys.* – 2007. – Vol. 47. – P. 595-634.
- 6 Longo S., Capitelli M., Hassouni K. The Coupling of PIC/MCC Models of Discharge Plasmas with Vibrational and Electronic Kinetics // *J. Phys. IV France*. – 1997. – Vol. 07. – P. C4-271.
- 7 Donko Z. Particle simulation methods for studies of low-pressure plasma sources // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2011. – Vol. 20. – P. 024001.
- 8 Matyash K., Schneider R., Kersten H. Kinetic modelling of dusty plasmas // *J. Phys.: Conf. Series*. – 2005. – Vol. 11. – P.248.
- 9 Land V., Matthews L. S., Hyde T.W., Bolser D. Fluid modeling of void closure in microgravity noble gas complex plasmas // *Phys. Rev. E*. – 2010. – Vol. 81. – P. 056402.
- 10 Alexandrov A.L., Schweigert I.V., Peeters F.M. A non Maxwellian kinetic approach for charging of dust particles in discharge plasmas // *New J. Phys.* – 2008. – Vol. 10. – P. 093025.
- 11 Khrapak S.A., Ivlev A.V. // *Complex and dusty plasmas: From Laboratory to Space*. – Boca Raton: CRC Press, eds. Fortov V. E., Morfill G. E., 2010. – P. 126.
- 12 Barnes M. S., Keller J. H., Forster J. C., O’Neill J.A., Coultas D.K. Transport of Dust Particles in Glow-Discharge Plasmas // *Phys. Rev. Lett.* – 1992. – Vol. 68. – P. 313-316.
- 13 Bastykova N. Kh., Kovács A.Zs., Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Korolov I., Hartmann P., Donkó Z. // *Proceedings of 20th SAPP (Symposium of Application of Plasma Processes)*. – Tatranska Lomnica, Slovakia, 2015, 17-22 January. – P. 268-272.
- 14 Bastykova N. Kh., Kovács A.Zs., Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Korolov I., Hartmann P., Donkó Z. Controlled levitation of dust particles in RF+DC discharges // *Contrib. to Plasma Physics*. – 2015. – Vol. 55. – P. 671-676.

References

- 1 V. Nosenko, J. Goree, A. Piel *Phys. Plasmas*, 13, 032106, (2006).
- 2 V. Nosenko, A.V. Ivlev, G.E. Morfill, *Phys. Plasmas*, 17, 123705-123706, (2010).
- 3 S. Iwashita, E. Schüngel, J. Schulze, P. Hartmann, Z. Donko, G. Uchida, K. Koga, M. Shiratani, U. Czarnetzki, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 46, 245202, (2013).
- 4 C.K. Birdsall, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 19, 65-85, (1991).
- 5 K. Matyash, R. Schneider, F. Taccogna, A. Hatayama, S. Longo, M. Capitelli, D. Tskhakaya, F.X. Bronold, *Contrib. Plasma Phys.*, 47, 595-634, (2007).
- 6 S. Longo, M. Capitelli, K. Hassouni, *J. Phys. IV France*, 07, C4-271, (1997).
- 7 Z. Donko, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 20, 024001, (2011).
- 8 K. Matyash, R. Schneider, H. Kersten, *J. Phys.: Conf. Series*, 11, 248, (2005).
- 9 V. Land, L.S. Matthews, T.W. Hyde, D. Bolser, *Phys. Rev. E*, 81, 056402, (2010).
- 10 A.L. Alexandrov, I.V. Schweigert, F.M. Peeters, *New J. Phys.*, 10, 093025, (2008).
- 11 S.A. Khrapak, A.V. Ivlev, *Complex and dusty plasmas: From Laboratory to Space*, Boca Raton: CRC Press, eds. Fortov V. E., Morfill G. E., 2010, 126.
- 12 M.S. Barnes, J.H. Keller, J.C. Forster, J.A. O’Neill, D.K. Coultas, *Phys. Rev. Lett.*, 68, 313-316, (1992).
- 13 N.Kh. Bastykova, A.Zs. Kovács, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, I. Korolov, P. Hartmann, Z. Donkó, *Proceedings of 20th SAPP (Symposium of Application of Plasma Processes)*, Tatranska Lomnica, Slovakia, 2015, 17-22 January, P. 268-272.
- 14 N.Kh. Bastykova, A.Zs. Kovács, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, I. Korolov, P. Hartmann, Z. Donkó, *Contrib. to Plasma Physics*, 55, 671-676, (2015).