

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

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

ПРОЦЕССЫ ЗАРЯДКИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ЗАМАГНИЧНОЙ ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Пылевая плазма широко распространена в природе, например, в космосе: дисках галактик, кольцах планет, пылевых туманностях, а также часто используется в различных технологических процессах, таких как производство микроэлектроники, в термоядерных установках с магнитным удержанием. В данной работе было исследовано влияние магнитного поля на процессы зарядки пылевых частиц в плазме газового разряда. Расчеты по изучению процессов зарядки пылевой частицы в присутствии магнитного поля проводились численно на основе методов частиц в ячейках и Монте-Карло для характерных параметров плазмы газового разряда. Были получены оценки заряда, характерное время зарядки пылевой частицы, а также радиальное распределение плотности электронов и ионов при различных значениях магнитного поля. Учет магнитного поля привел к уменьшению абсолютного значения заряда пылевой частицы и увеличению времени зарядки пылевой частицы. В присутствии магнитного поля в окрестности пылевой частицы уменьшаются плотности электронов и ионов, что свидетельствует о снижении заряда пылевой частицы за счет ограничения траектории частиц плазмы вдоль силовых линий магнитного поля.

Ключевые слова: газовый разряд, замагниченная плазма, заряд пылевых частиц, метод частиц в ячейках, метод Монте-Карло.

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

Institute of Experimental and theoretical physics, al-Farabi Kazakh National university,
Kazakhstan, Almaty, *e-mail: ramazan@physics.kz

Charging processes of dust particles in magnetized gas discharge plasma

Dusty plasma is widespread in nature, for example, in space: disks of galaxies, planetary rings, dust nebulae, and is also often used in various technological processes, such as the production of microelectronics, in thermonuclear installations with magnetic confinement. In this paper, the influence of the magnetic field on the charging processes of dust particles in the gas discharge plasma were investigated. Calculations to study the charging processes of dust particle in the presence of the magnetic field were carried out numerically on the basis of particle-in-cell and Monte Carlo methods for the characteristic parameters of the gas discharge plasma. Estimates of the charge, the characteristic charging time of the dust particle, and the radial distribution of the density of electrons and ions at different values of the magnetic field were obtained. Taking into account the magnetic field led to a decrease in the absolute value of the charge of the dust particle, and an increase in the charging time of the dust particle. In the presence of the magnetic field in the vicinity of the dust particle, the density of electrons and ions decreases, which indicates a decrease in the dust particle charge, due to the restriction of the trajectory of plasma particles along the magnetic field lines.

Key words: Gas discharge, magnetized plasma, the charge of dust particles, particle in cell method, Monte Carlo method.

Н.Х. Бастыкова*, С.К. Қоданова,
Т.С. Рамазанов, Ж.А. Молдабеков

ЭТФФЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.,
*e-mail: bastykova_nuriya@physics.kz

Тозаңды бөлшек поляризациясының әсерінен иондардың тозаңды бөлшекте классикалық шашырауы

Шаңды плазма табиғатта кең таралған, мысалы, ғарышта: галактикалардың дискілері, планетарлық сақиналар, сонымен қатар әртүрлі технологиялық процестерде, мысалы, микроэлектроника өндірісінде, термоядролық қондырғыларда қолданылады. Бұл жұмыста магнит өрісінің газдық разряд плазмасындағы тозаңды бөлшектердің зарядталу процестеріне әсері зерттелді. Магнит өрісінің қатысуымен тозаңды бөлшектердің зарядталу процестерін зерттеу бойынша газдық разряд плазмасына тән параметрлерге арналған есептеулер сандық түрде ұяшықтағы бөлшектер және Монте-Карло әдістері негізінде жүргізілді. Зарядтың мәні, тозаңды бөлшектердің зарядталу уақыты, сондай-ақ магнит өрісінің әр түрлі мәндерінде электрондар мен иондардың тығыздығының радиалды таралуы алынды. Магнит өрісін ескеру тозаңды бөлшек зарядының абсолюттік мәнінің азаюына және тозаңды бөлшектердің зарядталу уақытының ұлғаюына әкелді. Бұл магниттік өрістің күштік сызықтары бойымен плазма бөлшектерінің траекториясының шектелуі есебінен тозаң бөлшектерінің зарядының төмендеуін көрсетеді.

Түйін сөздер: газдық разряд, магниттелген плазма, тозаңды бөлшектің заряды, ұяшықтағы бөлшектер әдісі, Монте-Карло әдісі.

Введение

Пылевая плазма является привлекательным и интересным объектом исследования из-за счет ее широкого распространения в природе – на Земле и в космосе, в технологических процессах, применяется в медицине и активно исследуется в лабораторных условиях [1 -3]. Кроме того, пылевая плазма проявляет весьма необычные и уникальные свойства, что вызывает повышенный интерес, как у теоретиков, так и экспериментаторов. Она проста в получении и наблюдении, обычно имеется возможность управления системой пылевых частиц, обладает способностью к самоорганизации и образованию упорядоченных структур. В лабораторных условиях пылевые частицы преднамеренно вводятся в газоразрядную плазму и в последние тридцать лет появилось много работ, посвященных изучению свойств пылевой плазмы в газовом разряде [1-8].

Пылевые частицы, находящиеся в плазме, приобретают электрический заряд и представляют собой дополнительную заряженную компоненту плазмы. Заряд пылевой частицы является одним из основных параметров пылевой плазмы, во многом определяющим ее свойства. Пылевые частицы являются центрами рекомбинации плазменных электронов и ионов, а иногда могут служить и источниками электронов благодаря процессам термоэлектронной, фото-

электронной и вторичной электронной эмиссии. Заряд пылевых частиц определяется параметрами окружающей плазмы и не является фиксированной величиной, а может меняться во времени как из-за его флуктуаций, так и из-за перемещений пылинки в пространстве.

Изучение процессов зарядки пылевых частиц, дает возможность решить основную задачу на пути построения теории пылевой плазмы. В работе [9] показано, что присутствие пылевой компоненты существенным образом сказывается и на коллективные процессы в плазме. Процесс зарядки пылевых частиц и структура заряженных пылевых частиц и их эволюция были исследованы в работах [11-15]. Процессы, такие как, неравновесная функция распределения электронов и захваченные ионы пылевой частицей, которые влияют на заряд пылевых частиц были исследованы в работе [16], по итогам данных известно, что дополнительный ионный поток приводит к несколько более быстрой зарядке пылевой частицы, но не влияет на порядок заряда частиц.

Экспериментально заряд пылевой частицы в объемной плазме газового разряда постоянного тока исследовалось в работе [17]. По данным этой работы замечаются расхождения теории ОМЛ с экспериментом по определению заряда пылевой частицы, которое объясняется влиянием ионн-атомных столкновений. Это влияние учтено в работе [18] и приведены результаты

заряда пылевых частиц для различных размеров. Данные указывают на то, что ионн-атомные столкновения представляют собой важный фактор, который существенно уменьшает заряд частицы в типичных условиях газового разряда.

Первые исследования влияния магнитного поля на процессы зарядки пылевых частиц были выполнены Цытовичем [19], где был выполнен анализ эффектов, связанных с влиянием сильного магнитного поля на состояние пылевой плазмы. Показано что, при увеличении параметров внешнего магнитного поля заряд пылевой частицы сначала уменьшается (когда электроны в процессе зарядки становятся замагниченными), а затем, при дальнейшем увеличении магнитного поля, заряд пылевых частиц увеличивается (когда ионы также становятся замагниченными).

В работах [20,21] заряд пылинок рассчитывался с учетом магнитного поля в приближении ограниченных орбит (OML), а в работах [21,22] заряд пылевых частиц в пристеночной плазме термоядерного реактора с учетом влиянием магнитного поля рассчитывался методом частиц в ячейках (PIC). Из результатов этих работ следует, что влияние магнитного поля на заряд пылинки начинается с некоторого критического значения магнитного поля, которое определяется из равенства ларморовского радиуса электрона и размера пылевой частицы.

В работе [23-24] приведено описание экспериментальной установки MDPX, которая предоставляет возможность проводить эксперименты по замагниченной пылевой плазме. В недавних экспериментах по изучению процессов заряда пылевых частиц в замагниченной плазме показано, что абсолютная величина заряда пылевых частиц намного меньше, чем оценки по теоретической модели OML при наличии сильного магнитного поля. В связи с этим исследование о влиянии магнитного поля на заряд пылевых частиц в плазме газового разряда является актуальной.

Модель

В данной работе рассчитывался заряд неподвижной, первоначально нейтральной пылинки бесконечно большой массы. Для расчета использовался метод частиц в ячейках, а для учета столкновений использовался метод Монте-Карло.

Исследуется система, состоящая из нескольких десятков тысяч частиц. Рассмотрим плазму, состоящую из ионов с массой m_i и однократным положительным зарядом e и электронов с массой m_e , зарядом $-e$. В центре системы помещалась нейтральная сферическая пылинка заданного радиуса, поглощающая заряд всех падающих на нее ионов и электронов.

Начальное распределение электронов и ионов по координатам выбиралось равновероятным в объеме куба. Распределение по скоростям соответствовало распределению Максвелла на бесконечности. В зависимости от начального расстояния до макрочастицы распределение Максвелла по модулю скорости сдвигалось на величину энергии взаимодействия с макрочастицей. Направление скорости выбиралось изотропным. Таким образом, формировалось начальное распределение без связанных частиц, которые при определенных условиях могут сильно влиять на кинетические характеристики.

При моделировании рассматривается временная эволюция системы из n_e электронов и n_i ионов, заключенных в куб, в центре которого находится поглощающее сферическое тело радиуса a с зарядом $q_d = Z_d e < 0$, обладающее большой массой. Число ионов и электронов выбиралось таким, чтобы в целом система являлась электронейтральной: $n_i - n_e + Z_d = 0$. При таком выборе числа частиц плотность электронов в кубе оказывается меньше плотности ионов из-за того, что некоторая часть отрицательного заряда сосредоточена на макрочастице.

Траектории всех частиц в системе определяются путем решения уравнений Ньютона [23], а учет столкновений частиц проводился с помощью процедуры розыгрыша столкновений методом Монте-Карло [27-28]. Поглощение частиц плазмы осуществляется в том случае, если их траектории пересекают или касаются поверхности пылевой частицы.

Результаты расчетов и обсуждение

Расчеты по определению заряда пылевой частицы проводились для следующих параметров плазмы газового разряда: плотности электронов и ионов равны 10^9 см^{-3} , температура ионов 0,027 эВ и электронов 1 эВ. В таблицах 1-2 приведены ларморовский радиусы для электронов и ионов, заряд пылевой частицы,

отношение зарядов с/без учета магнитного поля и характерное время зарядки пылевых частиц с радиусом $a = 4 \mu\text{м}$ и $a = 8 \mu\text{м}$ при значениях магнитного поля $B \sim 1 \div 4 \text{ Т}$. В таблицах также приведены значения критического магнитного поля, рассчитанные по формуле (9) из статьи [21]. Оно определяется соотношением ларморовского радиуса электрона и радиуса пылевой частицы. Значение магнитного поля выбиралось в соответствии с работой [25], в которой описаны недавние эксперименты с газовым разрядом, в которых магнитное поле достигало значений 4 Т .

Из приведенных в таблицах оценок следует, что при всех значениях магнитного поля ларморовский радиус иона намного превышает радиус пылевой частицы, что соответствует случаю среднего магнитного поля [21]. Расчеты показывают, что с увеличением магнитного поля абсолютное значение заряда пылевой частицы начинает уменьшаться, если значение магнитного поля превышает критическое магнитное поле. Из приведенных результатов расчетов также следует, что увеличение магнитного поля приводит к увеличению времени зарядки пылевой частицы.

Численные расчеты зависимости заряда от времени для пылевой частицы с радиусом $a = 4 \mu\text{м}$ при различных значениях магнитного поля иллюстрируются на рисунке 1.

На рисунке 2 показаны радиальное распределение плотности электронов и ионов вокруг пылевой частицы в отсутствие магнитного поля и при наложении магнитного поля. Как видно из рисунка, при наложении магнитного поля в окрестности пылевой частицы уменьшается плотность как электронов, так и ионов, но более сильная замагниченность электронов приводит к понижению заряда пылевой частицы.

В качестве примера на рисунках 3(а) и 3(б) показаны траектории движения электронов и ионов вокруг пылевой частицы с радиусом $a = 4 \mu\text{м}$ при различных значениях магнитного поля $B = 0.1; 0.5; 2 \text{ Т}$. Магнитное поле ориентировано вдоль оси y . На рисунке 3 (а) четко видно резкое изменение динамики электронов. Фактически, при $B = 2 \text{ Т}$ в основном электроны, движущиеся вдоль оси y , захватываются пылевой частицей, то есть число столкновений, происходящих в плоскости, перпендикулярной оси y , значительно уменьшается.

Таблица 1 – Ларморовский радиусы для электронов и ионов, заряд пылевой частицы, отношение зарядов с/без учета магнитного поля и характерное время зарядки пылевых частиц с радиусом $a = 4 \mu\text{м}$ при различных значениях магнитного поля.

$B, \text{ Т}$	$a = 4 \mu\text{м}$			
	$B_{cr} = T$			
	$B=0$	$B=1 \text{ Т}$	$B=2 \text{ Т}$	$B=4 \text{ Т}$
$R_{L(e)}, \mu\text{м}$	-	2.4	1.2	0.6
$R_{L(i)}, \mu\text{м}$	-	106	53	26.5
Z_d	8247	3720	2036	685
$\Delta Z_d / Z_d$ ($B=0$)-100	-	55%	75%	92%
$t_{ch}, \mu\text{с}$	6.7	13.3	14.6	19.1

Таблица 2 – Ларморовский радиусы для электронов и ионов, заряд пылевой частицы, отношение зарядов с/без учета магнитного поля и характерное время зарядки пылевых частиц с радиусом $a = 8 \mu\text{м}$ при различных значениях магнитного поля.

$B, \text{ Т}$	$a = 8 \mu\text{м}$			
	$B_{cr} = T$			
	$B=0$	$B=1 \text{ Т}$	$B=2 \text{ Т}$	$B=4 \text{ Т}$
$R_{L(e)}, \mu\text{м}$	-	2.4	1.2	0.6
$R_{L(i)}, \mu\text{м}$	-	106	53	26.5
Z_d	17337	4746	1464	375
$\Delta Z_d / Z_d$ ($B=0$)-100	-	73%	92%	98%
$t_{ch}, \mu\text{с}$	6.8	15.8	18.8	22.5

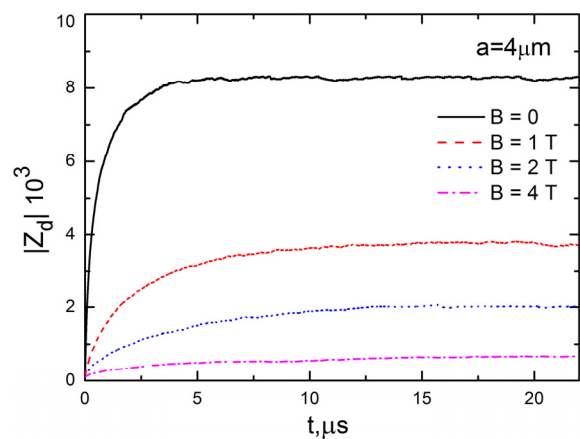


Рисунок 1 – Зависимость от времени заряда пылевой частицы при различных значениях магнитного поля

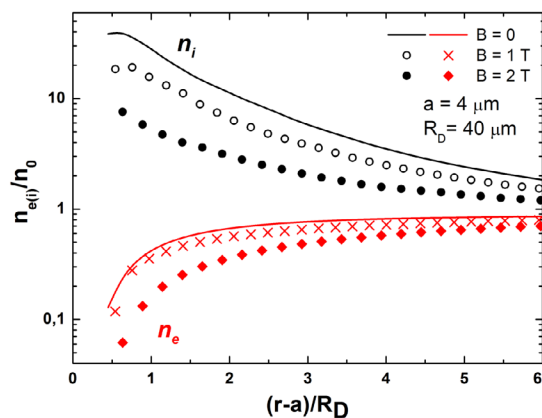


Рисунок 2 – Радиальное распределение плотности электронов и ионов вокруг пылевой частицы в отсутствии магнитного поля (сплошная линия) и в присутствии магнитного поля (символы)

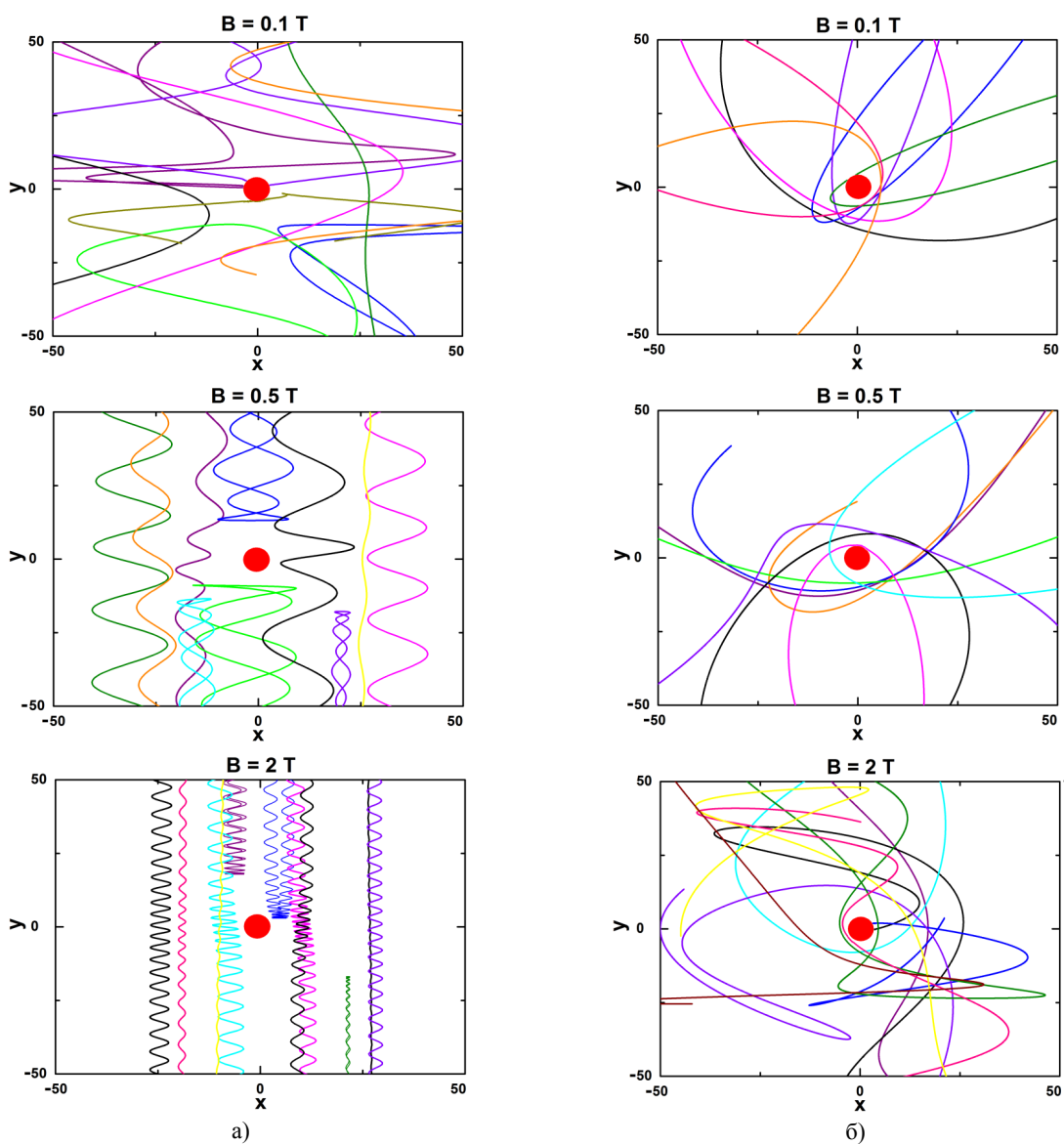


Рисунок 3 – Траектории частиц плазмы (электронов (а) и ионов (б)) при различных значениях магнитного поля

Из рисунка 3(б) видно, что столкновение пылевых частиц с ионами также меняется, даже если столкновение пылевых частиц с ионами не «замагничено» (то есть ионный ларморовский радиус больше, чем радиус пылевых частиц). Можно ожидать, что ионная динамика вблизи пылевой частицы может сильно измениться при определенных частотах столкновения ионов с атомами (давлениях газового разряда), даже если ионный ларморовский радиус больше радиуса пылевой частицы.

Заключение

В работе исследовано влияние магнитного поля на процессы зарядки пылевых частиц в плазме газового разряда численно на основе методов частиц в ячейках и Монте-Карло. Получены оценки заряда и характерного времени зарядки пылевой частицы. Показано, что учет влияния магнитного поля приводит к уменьшению абсолютного значения заряда пылинки и увеличению времени ее зарядки.

Получены также радиальные распределения плотностей электронов и ионов при различных значениях магнитного поля.

Показано, что с увеличением магнитного поля в окрестности пылевой частицы уменьшаются плотности как электронов, так и ионов. Результирующее воздействие магнитного поля приводит к снижению заряда пылевой частицы за счет ограничения траекторий частиц плазмы силовыми линиями магнитного поля.

В дальнейшем планируется провести расчеты по определению заряда пылевой частицы с учетом столкновения ионов с атомами вблизи ее поверхности в присутствии магнитного поля для различных типов разряда (газовый разряд, криогенный разряд и др.).

Благодарности

Выполненные исследования проведены в рамках гранта КН МОН РК AP05133536 «Исследование свойств низкотемпературной комплексной плазмы во внешнем магнитном поле (2018-2020 гг.)».

Литература

- 1 Fortov V.E. Dusty plasma: Theory and Experiment. In Encyclopedia of Low-Temperature Plasma. – Moscow: Nauka, 2006. – P.5.
- 2 Antipov S.N., Vasiliev M.M., Maiorov S.A., Petrov O.F., Fortov V.E. Dusty plasma structures in He-Kr DC glow discharge //JETP. – 2011. – Vol. 112. – P. 482-493.
- 3 Kretschmer M., Konopka U., Zhdanov S.K., Thomas H.M., Morfill G.E., Fortov V.E., Molotov V.I., Lipaev A.M., Petrov O.F. Particles inside the void of a complex plasma //IEEE Trans. Plasma Sci. – 2011. – Vol. 39. – P. 2758.
- 4 Fedoseev A.V., Sukhinin G.I., Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Bastykova N.Kh., Interaction between glow discharge plasma and dust particles //Contrib. Plasma Phys. – 2011. – Vol.18. – P.615.
- 5 Fedoseev A.V., Sukhinin G.I., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Dust-void formation in a dc glow discharge //Phys. Rev.E. – 2015. – Vol. 92. – P.023106.
- 6 Ramazanov T.S., D'yachkov L.G., Dzhumagulova K.N., Gabdullin M.T., Dosbolayev M.K., Ussenov Y.A., Moldabekov Zh.A., Petrov O.F., Vasiliev M.M., Myasnikov M.I., Fortov V.E., Savin S.F., Musabayev T.A., Zhantayev Zh.Sh. and Aimbetov A.A. Experimental investigations of strongly coupled Coulomb systems of diamagnetic dust particles in a magnetic trap under microgravity conditions //EPL. – 2016. – Vol. 116. – P. 45001.
- 7 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.
- 8 Orazbayev S.A., Ussenov Y.A., Ramazanov T.S., Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., A Calculation of the Electron Temperature of Complex Plasma of Noble Gases Mixture in CCRF Discharge // Contrib. Plasma Phys. – 2015. – Vol. 55. – P. 428-433.
- 9 Abdirakhmanov A.R., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. The gas discharge dusty plasma in a uniform magnetic field //AIP Conf. Proc.. – 2018. – Vol. 1925. – No. 020007.
- 10 Ramazanov T.S., Bastykova N.Kh., Ussenov Y.A., Kodanova S.K., Dzhumagulova K.N., and Dosbolayev M.K. The Behavior of Dust Particles Near Langmuir Probe //Contrib. Plasma Phys. – 2012. – Vol. 52, No. 2. – P.110–113.
- 11 Vasilyak L.M., Vladimirov V.I., Deputatova L., Lapitsky D.S., Molotov V.I., Pecherkin V.Ya., Filinov V.S., Fortov V.E. Coulomb stable structures of charged dust particles in a dynamical trap at atmospheric pressure in air //New Journal of Physics. – 2013. – Vol. 15. – No. 043047.
- 12 Lisin E.A., Vaulina O.S., Petrov O.F., Fortov V.E. Dust-particle charge in weakly ionized gas-discharge plasma //EPL. – 2012. – Vol.97. – No. 55003.
- 13 Antipov S.N., Asinovski E.I., Kirillin A.V., Maiorov S.A., Markovets V.V., Petrov O.F., Fortov V.E. Evolution of dust structures from room to cryogenic temperatures //AIP Conf.Proc. – 2008. – Vol.1041. – P. 157-158.
- 14 Antipov S.N., Asinovski E.I., Kirillin A.V., Maiorov S.A., Markovets V.V., Petrov O.F., Fortov V.E. Charge and structures of dust particles in a gas discharge at cryogenic temperatures //JETP. – 2008. – Vol.106. – P. 830-837.

- 15 Fortov V.E., Vasilyak L.M., Vechinkin S.P., Nefedov A.P., Polyakov D.N. Plasma- dust structures at cryogenic temperatures //Dokiady Physics. – 2002. – Vol. 47. – P.21-24.
- 16 Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Dzhumagulova K.N., and Bastykova N.Kh. The new method for measuring of dust particles charge in glow discharge plasma //EPL. – 2011. – Vol.96. – No. 45004.
- 17 Sukhinin G.I., Fedosev A.V., Antipov S.N., Petrov O.F., Fortov V.E. The influence of trapped ions and non-equilibrium EDF on dust particle charging //AIP Conf.Proc. – 2008. – Vol. 1041. – P. 149-150.
- 18 Ratynskaia S., Khrapak S., Zobnin A., Thoma M.H., Kretschmer M., Usachev A., Yaroshenko V., Quinn R.A., Morfill G.E., Petrov O., Fortov V. Experimental Determination of Dust-Particle Charge in a Discharge Plasma at Elevated Pressures //Phys. Rev. Lett. – 2004. – Vol. 93. – No. 085001.
- 19 Khrapak S.A., Ratynskaia S.V., Zobnin A.V., Usachev A.D., Yaroshenko V.V., Thomas M.N., Gretschemer M., Hosner M., Morfill G.E., Petrov O.F., Fortov V.E. Particle charge in the bulk of gas discharges //Phys. Rev. E. – 2005. – Vol. 72. – No. 016406.
- 20 Chang J.S., Spariosu K. Dust particle charging characteristics under a collisionless magneto-plasma //J. Phys. Soc. Japan. – 1993. – Vol.62. – P.97.
- 21 Tsytoich V.N., Sato N., Morfill G.E. Note on the charging and spinning of dust particles in complex plasmas in a strong magnetic field //New J. Phys. – 2003. – Vol. 5. – P. 43.1-43.9.
- 22 Tomita Y., Kawamura G., Yamada T., Ishihara O. Charging of Dust Particles in Magnetic Field //J. Plasma Fusion Res. Series. – 2009. – Vol. 8. – P. 273-276.
- 23 Kodanova S.K., Bastykova N.Kh., Ramazanov T.S., Maiorov S.A. Dust Particle Evolution in Divertor Plasma //IEEE Trans. Plasma Sci. – 2016. – Vol.44. – No. 7349235.
- 24 Kodanova S.K., Bastykova N.Kh., Ramazanov T.S., Nigmatova G.N., Maiorov S.A., The Effect of Magnetic Field on Dust Dynamic in the Edge Fusion Plasman //IEEE Trans. Plasma Sci. – 2018. – Vol.46. – P. 832-834.
- 25 Merlino R.L., Thomas E., Lynch B., LeBlanc S., Hall T., Konopka U., Rosenberg M., The Magnetized Dusty Plasma Experiment (MDPX) //AIP Conf.Proc. – 2018. – Vol.1928. – No. 020011.
- 26 Konopka U., Lynch B., Funkand D., Thomas E. //Book of abstracts ICPDP. – 2017. – Vol. 138.
- 27 Maiorov S.A., Vladimirov S.V., and Cramer N.F. Calculation of the Grain Charge Fluctuations in a Dusty Plasmas //Plasma Physics Reports. – 2002. – Vol.28. – P. 946.
- 28 Maiorov S.A. Influence of the Trapped Ions on the Screening Effect and Frictional Force in a Dusty Plasmas //Plasma Physics Reports. – 2005. – Vol. 31. – P.749.

References

- 1 V.E. Fortov, Dusty plasma: Theory and Experiment. In Encyclopedia of Low-Temperature Plasma, (Moscow, Nauka, 2006), p. 5.
- 2 S.N. Antipov, M.M. Vasiliev, et al, JETP, 112, 482-493 (2011).
- 3 M. Kretschmer, U. Konopka, et al, IEEE Trans. Plasma Sci., 39, 2758 (2011).
- 4 A.V. Fedoseev, G.I. Sukhinin, et al, Contrib. Plasma Phys. – 2011. – Vol. 18. – P. 615.
- 5 A.V. Fedoseev, G.I. Sukhinin, et al, Phys. Rev.E. – 2015. – Vol. 92. – P. 023106.
- 6 T.S. Ramazanov, L.G. D'yachkov, et al, EPL – 2016. – Vol. 116. – P. 45001.
- 7 S.A. Maiorov, S.K. Kodanova, et al, Phys. Plasmas – 2015. – Vol. 22. – P. 033705.
- 8 S.A. Orzabayev, Y.A. Ussenov, T.S. Ramazanov, et al, Contrib. Plasma Phys., 55, 428-433, (2015).
- 9 A.R. Abdirakhmanov, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov, AIP Conf. Proc., 1925, 020007 (2018).
- 10 T.S. Ramazanov, N.Kh. Bastykova, et al, Contrib. Plasma Phys., 52 (2), 110-113 (2012).
- 11 L.M. Vasilyak, V.I. Vladimirov, et al, New Journal of Physics, 15, 043047 (2013).
- 12 E.A. Lisin, et al, EPL, 97, 55003 (2012).
- 13 S.N. Antipov, et al, AIP Conf.Proc., 1041, 157-158 (2008).
- 14 S.N. Antipov, et al, JETP, 106, 830-837 (2008).
- 15 V.E. Fortov, et al, Dokiady Physics, 47, 21-24 (2002).
- 16 T.S. Ramazanov, et al, EPL, 96, 45004 (2011).
- 17 G.I. Sukhinin, et al, AIP Conf.Proc., 1041, 149-150 (2008).
- 18 S. Ratynskaia, et al, Phys. Rev. Lett., 93, 085001 (2004).
- 19 S.A. Khrapak, et al, Phys. Rev. E., 72, 016406 (2005).
- 20 J.S. Chang K. Spariosu J. Phys. Soc. Japan 62 97 (1993).
- 21 V.N. Tsytoich, et al, New J. Phys. 5, 43.1-43.9 (2003).
- 22 Y. Tomita, G. Kawamura, et al, J. Plasma Fusion Res. Series, 8, 273-276 (2009).
- 23 S.K. Kodanova, et al, IEEE Trans. Plasma Sci., 44, 525-527, 7349235 (2016).
- 24 S.K. Kodanova, et al, IEEE Trans. Plasma Sci., 46, 832-834 (2018).
- 25 R.L. Merlino, et al, AIP Conf.Proc., 1928, 020011 (2018).
- 26 U. Konopka, et al, Book of abstracts ICPDP, 138 (2017).
- 27 S.A. Maiorov, et al, Plasma Physics Reports, 28, 946 (002).
- 28 S.A. Maiorov, Plasma Physics Reports, 31, 749 (2005).