

ЕЛЕНА СОСЛАНОВНА ДЗЛИЕВА

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры общей физики 1 физического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

plasmadust@yandex.ru

МАКСИМ АНАТОЛЬЕВИЧ ЕРМОЛЕНКО

аспирант кафедры общей физики 1 физического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

plasmadust@yandex.ru

ВИКТОР ЮРЬЕВИЧ КАРАСЕВ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики 1 физического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

plasmadust@yandex.ru

ЛЕОНТИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ НОВИКОВ

инженер кафедры общей физики 1 физического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

plasmadust@yandex.ru

СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ ПАВЛОВ

инженер кафедры общей физики 1 физического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

plasmadust@yandex.ru

ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ ПОЛИЩУК

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры общей физики 1 физического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

plasmadust@yandex.ru

АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ ЭЙХВАЛЬД

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики 1 физического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

eichel@e-mail.ru

О ПРИЛОЖЕНИЯХ ЛЕВИТАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ГРАНУЛ*

Приводится обзор применений пылевой плазмы, как уже существующих и зарекомендовавших себя, так и новых перспективных ее приложений. Детально рассмотрены методы воздействия на пылевую заряженную систему, возможности ее контроля в технологических и энергетических установках. Подробно рассмотрены новые направления исследования, связанные с модификацией поверхности и разделения порошков плазмой.

Ключевые слова: пылевая плазма, технологические приложения, модификация поверхности плазмой

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные исследования комплексной (пылевой) плазмы [9], [12], [17], а также ее применение в технологических установках начались одновременно. Предсказание Икези в 1986 году существования в низкотемпературной плазме сильнокоррелированных систем с сильной связью было подтверждено в 1994 году в технологических установках плазменного травления [12], а также синтеза сферических частиц. На протяжении почти двадцати лет фронтальных исследований комплексной плазмы был получен ряд значимых приложений, а также были проведены направленные на их развитие фундаментальные исследования. Это синтез наночастиц, энергетика, экология и медицина.

Пылевые гранулы, находящиеся внутри газовых разрядных камер, способны влиять на свойства основной плазмы. Например, в работе [1] количественно были обнаружены такие влияния на вольт-амперные характеристики тлеющего разряда, а в работах [2], [20] описано изменение электронной концентрации при росте и агломерации наночастиц. Следовательно, для работы газоразрядных устройств в условиях возможного появления пылевых частиц необходимо учитывать их влияние на разряд. В энергетических устройствах и установках ИТЭР появление частиц вблизи стенок может приводить к срывам. В современных технологических процессах обработки поверхностей, плазменном травлении и напылении, пылевые частицы являются не-

желательным побочным продуктом. При изготовлении компьютерных микрочипов выбитые ионами фрагменты материала зависают в виде облаков над изготовленными образцами. В случае их последующего осаждения при существенной агломерации или росте размеров со временем появляется брак в выходе продукции. На производствах сегодня применяется контроль пылевых облаков, образующихся внутри технологических камер по рассеянию лазерного излучения, и используются специальные устройства для удаления частиц. Для оптимизации работы технологических устройств, в которых может появляться пылевая компонента, возникает необходимость применять стойкие к плазменному воздействию материалы (вольфрам и др.) покрытия стенок и использовать в качестве управления пылью методы динамики, развитые в последние годы в фундаментальных научных исследованиях пылевой плазмы.

Описание уже развитых приложений можно найти в литературе, например [10], [20]. В то же время возникшие новые направления исследований и обнаруженные в комплексной плазме новые физические явления показали дополнительные потенциальные возможности приложений левитирующих в комплексной плазме пылевых частиц. В обзоре представлены методы управления динамикой пылевых структур, новые возможности диагностики и применения комплексной плазмы.

ДИНАМИКА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ

Управление плазменно-пылевыми образованиями, как и отдельными частицами, осуществляется посредством действующих на них сил [5]. *Динамика пылевой плазмы* достаточно полно изучена и описана в обзорных работах и учебной литературе [9], [12], [17]. В большинстве экспериментов доминирующей силой является сила тяжести, именно она определяет условия левитации пылевых частиц в наземных лабораторных экспериментах. Наклон разрядной камеры как целого создает «скатывающую» составляющую силы тяжести, что приводит к самопроизвольному «стеканию» структуры к боковой стенке камеры, откуда ее удаление производится существенно проще. Данное воздействие было предложено в исследованиях [4] и служило для перемещения пылевой структуры внутри камеры из приосевой области к пристеночной.

Электростатическая сила в пылевой плазме, как правило, сводится к произведению заряда частицы на напряженность поля, поскольку размер гранул меньше длины экранирования. Примеры управления пылевыми структурами посредством электростатической силы подробно описаны в [5]. Часто данная сила применяется не только для удержания пылевых гранул, но и для

их удаления из разрядных объемов, например, для ядерно возбуждаемой пылевой плазмы [16].

Сила термофореза, связанная с температурными градиентами в плазме, может оказаться достаточно большой и даже компенсировать вес частиц для их левитации. В [1], [2], [5] она использовалась для построения пылевых структур сложной формы. В [7] азимутально несимметричное изменение силами термофореза электростатической пылевой ловушки дало изменение в пространственном расположении пылевых частиц. Кроме того, посредством применения силы термофореза можно перемешивать несколько плазменно-пылевых образований, что может быть использовано в технологиях осаждения частиц.

Сила ионного увлечения связана с потоком плазменных частиц, передающих импульс при их направленном движении через пылевую структуру. Для субмикронных частиц данная сила может оказаться доминирующей. При воздействии внешнего магнитного поля данная сила может оказаться единственной, действующей вдоль выделенного направления, или компенсироваться действием только силы сопротивления о нейтральный газ – силы Эпштейна, или силы Стокса [14].

Левитация пылевых гранул определяется балансом сил, она существенно зависит от размера частиц и от условий в плазме [15].

Динамика пылевых частиц применяется также для *диагностики разрядов и характеристик частиц*. Диагностика тлеющего разряда является актуальной задачей, решаемой в последнее время в связи с тем, что он используется как среда для формирования плазменно-пылевых структур. В случае пылевой плазмы метод электрического зонда, как правило, неприменим, поэтому для измерения электрических характеристик разряда проводят наблюдения за инъектированными в разряд зондирующими частицами. Исследуя траектории зондирующих частиц, можно построить карты скоростей и ускорений пробных частиц. Затем можно оценить силы, действующие на эти частицы. Подобная методика использовалась в ВЧ-разряде для измерения сил, действующих на эти частицы в «войде» в центре плазменно-пылевой структуры [18], а также для измерения заряда у пылевых частиц [13].

По траекториям падающих частиц можно определять электрические характеристики разряда. В работе [8] таким методом прозондирована область пылевой ловушки в стратифицированном разряде. Если использовать для диагностики калиброванные частицы, то можно им приписать определенный заряд. Из баланса сил, действующих на эту частицу, вычислить продольную и радиальную составляющую электрического поля. Подбирая частицы определенного размера и плотности, можно прозондировать нужную для исследователя область разряда.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕВИТАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ. ЭФФЕКТ ОТБОРА ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ

В комплексной плазме происходит самоорганизация и упорядочение пылевой компоненты. Обычно это явление наблюдается в статике, когда процесс формирования упорядоченных структур завершен. При работе с калиброванными порошками, так же как при численном моделировании, частицы рассматриваются как материальные точки, несущие на себе определенный заряд. В этой связи необходимо отметить, что такой подход игнорирует исследование самого процесса самоорганизации, при котором плазма «отбирает» частицы, способные оставаться в плазменно-пылевой структуре. В работе [3] недавно применен другой подход к изучению процесса самоорганизации в пылевой плазме через количественное изучение отбора частиц, которое может быть реализовано в эксперименте. Применяется полидисперсный порошок с широким разбросом размеров и формы частиц. Далее, из пылевой ловушки собирается и извлекается плазменно-пылевое образование, оценивается размер и форма отобранных плазмой реально левитирующих частиц. Приведем гистограмму распределений частиц по размерам, полученную в стандартных условиях наблюдения – в стратифицированном тлеющем разряде в неоне (рис. 1). Выполненные численные оценки левитации частиц через баланс сил, действующих на пылевые гранулы в стратифицированном разряде, хорошо согласуются с обнаруженным размером и формой частиц в работе [3]. Обнаружение отбора частиц принципиально позволяет использовать плазму как устройство для разделения порошков.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ОТБОРА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ И МОДИФИКАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ГРАНУЛ

Проведенные к настоящему времени исследования модификации поверхности плазмой в основном сводятся к изучению плазменной

обработки поверхностей плазмой, содержащей высокоэнергетические ионы, в меньшей степени отражают исследования модификации ППС. Можно перечислить решаемые задачи и отметить результаты, важные для применения в пылевой плазме.

1) В присутствующей пылевой плазме в установках синтеза частиц выращиваются сферические гранулы размером до нескольких микрометров. Синтез и выращивание сферических частиц из газовой фазы происходят в пылевой плазме [11]. В газовых безэлектродных камерах в химически активных газах и смесях выращиваются сферические нано- и микрочастицы на уровне масштабного производства. Применяется метан-argonовая, силан-кислородная и другие газовые смеси. В качестве затравки применяются наноразмерные частицы, являющиеся стоком плазменного потока и центрами осаждения материала. Размер гранул и скорость их роста регулируются подводимой мощностью ВЧ-разряда.

2) Изучается изменение рельефа облучаемой плазмой поверхности в целях как развития, так и сглаживания рельефа. Изменение (модификация) рельефа реализуется, как правило, в плазмах с высокоэнергетическими ионами. Потоки плазмы неоднородно распыляют рельеф на различных участках. Получены результаты с металлическими и диэлектрическими материалами поверхности. Развитие рельефа обусловлено различными скоростями эрозии соседних участков поверхности. Так, в поликристаллических поверхностях крупномасштабные элементы рельефа обусловлены различной ориентацией кристаллитов поверхности. В многофазных сплавах, кроме названных причин, работают различные величины коэффициентов распыления фаз. Конические выступы и пирамиды на поверхности рельефа обусловлены наличием инородных включений и слабораспыляемых преципитатов. Появление углублений на поверхности травления связано с выходом дислокаций на поверхность. В образовании рельефа неметаллических веществ дополнительную роль, ускоряющую и даже доминирующую, играют электроны.

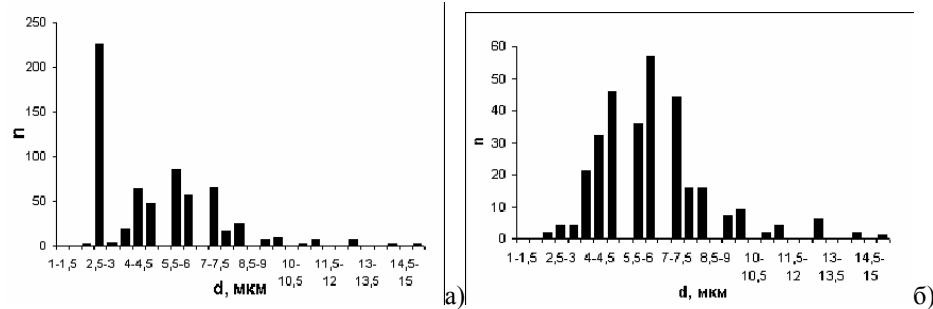


Рис. 1. Распределение частиц, извлеченных из пылевой ловушки в страте в Ne, по размерам. Условия: $P = 0,3$ Торр, $i = 1,6$ мА.
а) Все извлеченные частицы; б) частицы некомпактной (вытянутой) формы. Распределение построено по 400 частицам

В ряде случаев причины изменения рельефа выявлены недостаточно. При нормальном облучении поверхности аморфных тел ионами инертных газов наблюдается полировка – сглаживание рельефа и предотвращение его развития. Для поликристаллических материалов эффект обеспечивают ионы с энергиями до 100 эВ. Полировка металла в области надпороговых энергий ионов достигнута при наклонном облучении.

Развитие рельефа может происходить как следствие радиационно-стимулированных процессов в объеме твердого тела. Установлено, что ионные и плазменные потоки инициируют процессы в приповерхностных слоях. Появляются поверхностные напряжения, активируется диффузия, может изменяться фазовый и компонентный состав материала. Даные процессы сегодня достаточно изучены, по их описанию существует обширный материал.

3) Исследуется возможность изменения физических и химических свойств поверхности – адгезии, гидрофильности. Облучение плазмой, в частности волокон и полимерных материалов, используется для изменения прочности сцепления поверхности. Обработка в плазмообразующих газах – кислороде, азоте, аргоне и других приводит к увеличению поверхностной энергии полимеров. В результате меняются гидрофильность и адгезия. Появление новых функциональных групп и активных центров позволяет менять свойство поверхности также и при помощи последующей прививки молекул других газов, обладающих требуемыми качествами.

4) Нанесение на поверхность частиц покрытий из материала, отличного от материала частиц. Порошковые частицы железа 2 мкм размера в плазме ВЧ-разряда покрывались слоем алюминия при его распылении в магнетроне. Показано, что данный способ является новым шагом в порошковой модификации, реализуемой в пылевой плазме. Также показано, что форма частиц зависит от материала. Медное и алюминиевое покрытие приводит к росту несфериче-

ской формы частиц, а графит, титан и вольфрам дают компактные частицы сферической формы.

5) Исследования в разных типах газов и разных разрядах, направленные на установление механизмов модификации поверхности. Использование различных способов создания плазмы и условий в плазме позволяет получать избирательную модификацию поверхности и исследовать ее механизм. В частности, исследования в дуговых и искровых разрядах показали роль сверхэнергетических ионов в полях до 500 МВ/м для формирования кратеров на поверхности меди размером до 10 мкм, сравнимых с размерами частиц в пылевой плазме. В данных условиях показана роль высокозенергетических ионов, а также высокоплотных плазменных потоков ионов и нейтралов на поверхность [19].

ДАЛЬНЕЙШИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ

Из приведенного выше обзора можно видеть несколько новых перспективных приложений комплексной плазмы, она может с успехом применяться для следующих задач:

- 1) Очистка поверхности;
- 2) Выравнивание и модификация поверхности;
- 3) Прецизионное осаждение частиц;
- 4) Отбор частиц в различных диапазонах;
- 5) Диагностика плазмы;
- 6) Исследование экстремальных состояний и новых свойств вещества.

Проиллюстрируем некоторые из них. Рис. 2 доказывает возможность равномерной всесторонней модификации поверхности. Подобные результаты также были получены в [6]. Тонкое разделение порошков плазмой возможно в широком диапазоне размеров частиц. Исследование новых свойств вещества, «мягкой материи», возможно в плазменно-пылевых структурах. К их числу относятся экстремальный поверхностный заряд вещества, аномальные вязкостные и магнитные свойства.

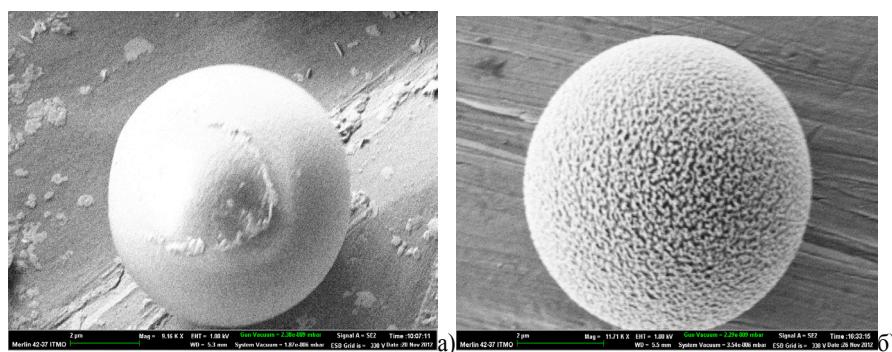


Рис. 2. Образцы изображений пылевых гранул, полученных с помощью электронного микроскопа, для пылевых частиц меламин-формальдегида до погружения в плазму – а) и после непродолжительного помещения в струту в разряд в неоне – б). Видно появление на поверхности хорошо структурированного «плазменного» рисунка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном обзоре описаны реализации приложений пылевой плазмы, как уже имеющиеся, так и потенциальные, основанные на

последних фундаментальных исследованиях. Представлены методы управления плазменно-пылевыми образованиями на основе динамики пылевых частиц.

*Работа поддержанна грантом РНФ № 14-12-00094.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василяк Л. М. и др. Кооперативный характер образования пылевых структур в плазме // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. Вып. 3. С. 609–613.
2. Василяк Л. М. и др. Пылевые частицы в термофоретической ловушке в плазме // ЖЭТФ. 2003. Т. 123. Вып. 3. С. 493–497.
3. Дзлиева Е. С., Каравес В. Ю., Эйхвальд А. И., Иванов А. Ю. Об управлении ППС в лабораторных экспериментах и технологических процессах // Лазерные исследования в СПбГУ. СПб., 2009. С. 171–179.
4. Дзлиева Е. С., Каравес В. Ю., Эйхвальд А. И. О гипотезе вращения газа в магнитомеханическом эффекте // Оптика и спектроскопия. 2004. Т. 97. № 1. С. 107–113.
5. Дзлиева Е. С., Ермоленко М. А., Каравес В. Ю. Определение размеров левитирующих частиц в пылевой плазме в тлеющем разряде // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 1. С. 147–150.
6. Жариков Н. Е., Пискунов А. А., Подрядчиков С. Ф., Семенов А. В., Хахаев А. Д., Щербина А. И. Модификация свойств плазменно-пылевых структур и микрочастиц в комплексной плазме // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6 (111). С. 99–108.
7. Каравес В. Ю., Иванов А. Ю., Дзлиева Е. С., Эйхвальд А. И. Об упорядоченных пылевых структурах, формируемых в тлеющем разряде // Журн. эксп. теор. физ. 2008. Т. 133. Вып. 2. С. 460–465.
8. Каравес В. Ю., Эйхвальд А. И., Дзлиева Е. С. Применение зондирующих пылевых частиц для исследования стратифицированного разряда с плазменно-пылевыми структурами в магнитном поле // Оптика и спектроскопия. 2006. Т. 101. № 3. С. 503–510.
9. Цытович В. Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // УФН. 1997. Т. 167. С. 57–99.
10. Цытович В. Н., Морфилл Г. Е., Томас Х. Комплексная плазма: IV. Теория комплексной плазмы. Приложения // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 10. С. 877–929.
11. Chu J. H., Lin I. Direct observation of Coulomb crystals and liquids in strongly coupled rf dusty plasmas // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 72. P. 4009–4012.
12. Dusty plasmas / Ed. by A. Boushoule. Orlean, 1999. 408 p.
13. Fortov V. E., Petrov O. F., Usachev A. D., Zobnin A. V. Micron-sized particle-charge measurements in an inductive rf gas-discharge plasma using gravity-driven probe grains // Phys. Rev. E. 2004. Vol. 70. P. 046415.
14. Karasev V. Yu., Dzlieva E. S., Ivanov A. Yu., Eikhval'd A. I. Rotational motion of dusty structures in glow discharge in longitudinal magnetic field // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74. P. 066403.
15. Nunomura S., Ohno N., Takamura S. Effects of Ion Flow by Drift on Dust Particle Behavior in Magnetized Cylindrical Electron Cyclotron Resonance Plasmas // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. Vol. 36. Part 1. № 2. P. 877–883.
16. Sato N. Dust collection and removal – NFP collector // Thin Solid Films. 2004. Vol. 457. P. 285.
17. Shukla P. K., Mamun A. A. Introduction to Dusty Plasma Physics. IoP Publishing, London, 2002. 271 p.
18. Thomas E. Jr., Annaratone B. M., Morfill G. E., Rothermel H. Measurements of forces acting on suspended microparticles in the void region of a complex plasma // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 66. P. 016405.
19. Timko H. et al. Mechanism of surface modification in the plasma-surface interaction in electrical arcs // Phys. Rev. 2010. B. 81. 184109.
20. Vladimirov S. V., Ostrikov K., Samarian A. A. Physics and Applications of Complex Plasmas / Imperial College. London, 2005.

Dzlieva E. S., St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)
Ermolenko M. A., St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)
Karasev V. Yu., St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)
Novikov L. A., St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)
Pavlov S. I., St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)
Polishchuk V. A., St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)
Eykhal'd A. I., St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)

ABOUT APPLICATIONS OF THE DUST GRANULES LEVITATION

The applications of dust plasma as already existing and proved as its new perspective appendices are reviewed in the article. The methods of influence on the dust charged system, possibilities of its control in technological and power installations are considered in details. The new directions of research connected with modification of grain surface and division of powders by plasma are discussed.

Key words: dust plasma, technological applications, modification of a surface by plasma

REFERENCES

1. Vasiliyak L. M. et al. Cooperative nature of the formation of dust structures in plasma [Kooperativnyy kharakter obrazovaniya pylevykh struktur v plazme]. Zh. Exp. Teor. Fiz. 2002. Vol. 121. Issue 3. P. 609–613.

2. Vasilyak L. M. et al. Dust particles trapped in thermophoretic [Pylevye chastitsy v termoforeticheskoy lovushke v plazme]. *Zh. Exp. Teor. Fiz.* 2003. Vol. 123. Issue 3. P. 493–497.
3. Dzlieva E. S., Karasev V. Yu., Eykhval'd A. I., Ivanov A. Yu. On the control of DPS in laboratory experiments and processes [Ob upravlenii PPS v laboratornykh eksperimentakh i tekhnologicheskikh protsessakh]. *Lazernye issledovaniya v SPbGU* [Laser Research in SPbSU]. St. Petersburg, 2009. P. 171–179.
4. Dzlieva E. S., Karasev V. Yu., Eykhval'd A. I. Abouthypothesis rotation of the gas in the magnetomechanical effect [O gipoteze vrashcheniya gaza v magnitomechanicheskem effekte]. *Opt. and Spectr.* 2004. Vol. 97. № 1. P. 107–113.
5. Dzlieva E. S., Ermolenko M. A., Karasev V. Yu. Sizing levitating particles in a dusty plasma glow discharge [Opredelenie razmerov levitiruyushchikh chastits]. *Zhurn. Tech. Fiz.* 2012. Vol. 82. № 1. P. 147–150.
6. Zharkov N. E., Piskunov A. A., Semenov A. V., Khakhaev A. D., Shcherbina A. I. Modification of the properties of plasma-dust structures and micro-particles in the complex plasma [Modifikatsiya svoystv plazmenno-pylevykh struktur i mikrochastits v kompleksnoy plazme]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Proceedings of the Petrozavodsk State University. Natural & Engineering Sciences]. 2010. № 6 (111). P. 99–108.
7. Karasev V. Yu., Ivanov A. Yu., Dzlieva E. S., Eykhval'd A. I. On ordered dust structures formed in a glow discharge [Ob uporyadocheniyakh pylevykh strukturakh, formiruemых v tleyushchem razryade]. *Zh. Exp. Teor. Fiz.* 2008. Vol. 133. Issue 2. P. 460–465.
8. Karasev V. Yu., Eykhval'd A. I., Dzlieva E. S. Application of sounding dust particles for study stratified discharge dusty plasma structures in magnetic field [Primenenie zondiruyushchikh pylevykh chastits dlya issledovaniya stratifitsirovannogo razryada s plazmenno-pylevymi strukturami v magnitnom pole]. *Opt. and Spectr.* 2006. Vol. 101. № 3. P. 503–510.
9. Tsytovich V. N. Dusty crystals, drops and clouds [Plazmenno-pylevyе kristally, kapli i oblaka]. *Uspekhi fizicheskikh nauk.* 1997. Vol. 167. P. 57–99.
10. Tsytovich V. N., Morfill G. E., Thomas K. Complex Plasmas: IV. The theory of complex plasma. Applications [Kompleksnaya plazma: IV. Teoriya kompleksnoy plazmy. Prilozheniya]. *Phys. plasm.* 2004. Vol. 30. № 10. P. 877–929.
11. Chu J. H., Lin I. Direct observation of Coulomb crystals and liquids in strongly coupled rf dusty plasmas // *Phys. Rev. Lett.* 1994. Vol. 72. P. 4009–4012.
12. Dusty plasmas / Ed. by A. Boushoule. Orlean, 1999. 408 p.
13. Fortov V. E., Petrov O. F., Usachev A. D., Zobnin A. V. Micron-sized particle-charge measurements in an inductive of gas-discharge plasma using gravity-driven probe grains // *Phys. Rev. E.* 2004. Vol. 70. P. 046415.
14. Karasev V. Yu., Dzlieva E. S., Ivanov A. Yu., Eykhval'd A. I. Rotational motion of dusty structures in glow discharge in longitudinal magnetic field // *Phys. Rev. E.* 2006. Vol. 74. P. 066403.
15. Nunomura S., Ohno N., Takamura S. Effects of Ion Flow by $\vec{E} \times \vec{B}$ Drift on Dust Particle Behavior in Magnetized Cylindrical Electron Cyclotron Resonance Plasmas // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1997. Vol. 36. Part 1. № 2. P. 877–883.
16. Sato N. Dust collection and removal – NFP collector // *Thin Solid Films.* 2004. Vol. 457. P. 285.
17. Shukla P. K., Mamun A. A. *Introduction to Dusty Plasma Physics.* IoP Publishing. London, 2002. 271 p.
18. Thomas E. Jr., Annaratone B. M., Morfill G. E., Rothermel H. Measurements of forces acting on suspended microparticles in the void region of a complex plasma // *Phys. Rev. E.* 2002. Vol. 66. P. 016405.
19. Timko H. et al. Mechanism of surface modification in the plasma-surface interaction in electrical arcs // *Phys. Rev.* 2010. B. 81. 184109.
20. Vladimirov S. V., Ostrikov K., Samarian A. A. *Physics and Applications of Complex Plasmas* / Imperial College. London, 2005.

Поступила в редакцию 15.12.2014