

На правах рукописи

Тимофеев Алексей Владимирович

**Аномальный разогрев движения пылевых частиц
в плазме газового разряда**

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)” на кафедре физики высокотемпературных процессов (Базовый институт Учреждение Российской академии наук Объединённый институт высоких температур РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Норман Генри Эдгарович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Ваулина Ольга Станиславовна

доктор физико-математических наук,
профессор Попель Сергей Игоревич

Ведущая организация: Государственный научный центр
Российской Федерации Троицкий институт
инновационных и термоядерных исследований
(ГНЦ РФ ТРИНИТИ)

Защита состоится “28” декабря 2011 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 Объединённого института высоких температур РАН по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН

Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу:
125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2, ОИВТ РАН

Автореферат разослан “18” ноября 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.110.02
доктор физико-математических наук



А.Л. Хомкин

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию механизма разогрева движения пылевых частиц до аномально высоких кинетических энергий. Построена модель, описывающая движение пылевых частиц в монослое в плазме газового разряда с учётом флуктуаций заряда пылевых частиц и особенностей приэлектродного слоя разряда. Рассмотрены структурные и динамические свойства системы пылевых частиц с учётом совместного влияния различных стохастических и нелинейных явлений разной природы. Исследованы механизм разогрева вертикального и горизонтального движения пылевых частиц и процесс переноса энергии в плазменно-пылевой системе.

Актуальность работы обусловлена широкой распространённостью пылевой плазмы [1–3] как в природе (например, в космосе, в верхних слоях атмосферы), так и в целом ряде технологических процессов (например, при производстве микроэлектроники, в термоядерных установках с магнитным удержанием). Пылевая плазма является сложным объектом для теоретического исследования, так как большое количество процессов, как в самой плазме, так и при взаимодействии плазмы с пылевыми частицами затрудняет создание общей аналитической теории. В частности, одновременное включение в модель всех типов частиц (атомов, ионов, электронов, пылинок) на данный момент не представляется возможным.

Пылевая плазма активно исследуется в лабораторных условиях. Лабораторная пылевая плазма является экспериментальной моделью для изучения физических процессов в системах взаимодействующих частиц в области физики неидеальной плазмы и в других областях естественных наук, таких как физика конденсированных сред, химия, биология, физика атмосферы и т.д.

В лабораторных экспериментах [4–15] было обнаружено, что пылевые частицы в плазме разряда при определённых условиях приобретают кинетическую энергию порядка 10 эВ и выше, что значительно превышает температуру ионов, а также температуру электронов в рассматриваемом разряде. Предложенные объяснения [10, 11, 16–25] данного явления либо не позволяют провести полноценное сравнение с экспериментальными данными, либо не согласуются с ними. В связи с этим развитие новых подходов для объяснения указанных особенностей плазменно-пылевой системы является актуальным.

Цель работы.

1) Развитие модели для исследования динамических свойств пылевой плазмы с учётом флуктуаций заряда и особенностей приэлектродного слоя.

2) Исследование зависимости средней кинетической энергии вертикальных и горизонтальных колебаний, среднего межчастичного расстояния и параметра неидеальности пылевой компоненты от параметров системы.

3) Анализ допустимости применения понятия температуры для описания динамики пылевых частиц.

4) Определение механизмов передачи энергии между различными степенями свободы системы пылевых частиц. Объяснение явления разогрева движения пылевых частиц до температур, превышающих температуры ионов и электронов. Построение общей схемы переноса энергии в пылевой плазме.

Научная новизна работы. Предложена методика исследования структурных и динамических свойств системы пылевых частиц в плазме газового разряда с учётом флуктуаций заряда и особенностей приэлектродного слоя с помощью метода молекулярной динамики (МД) и последующего восстановления аналитических зависимостей средней кинетической энергии, параметра неидеальности и других характеристик от параметров системы.

С помощью этой методики были изучены особенности явления разогрева движения пылевых частиц в плазме газового разряда. Выявлена зависимость средней кинетической энергии вертикального и горизонтального движения пылевых частиц от параметров системы с учётом флуктуаций заряда пылевой частицы, зависимости заряда от расстояния до электрода и расстояния до других пылевых частиц, а также с учётом зависимости вертикального электрического поля от расстояния до электрода. На основе анализа трёх различных случаев предложены аналитические формулы для среднего межчастичного расстояния, параметра неидеальности системы пылевых частиц и средней кинетической энергии центра масс системы пылевых частиц.

Предложено обоснование и границы применимости понятия температуры для описания динамики пылинок. Установлен механизм передачи энергии от вертикального движения пылинок к горизонтальному и обратно. Найдена связь между амплитудами вертикальных и горизонтальных колебаний пылинок. Построена схема передачи энергии в плазменно-пылевой системе.

Практическая ценность работы. Результаты диссертации могут быть использованы для оценки структурных и динамических характеристик систем пылевых частиц в плазме газового разряда, а также для определения условий разогрева движения пылевых частиц до аномально высоких энергий.

Положения, выносимые на защиту. Предложен подход для изучения свойств плазменно-пылевой системы и определения зависимости характеристик пылевой подсистемы от её параметров.

1. Выявление параметров, определяющих среднюю кинетическую энергию вертикального движения, и параметров, определяющих среднюю кинетическую энергию горизонтального движения пылевых частиц.

2. Зависимость параметра неидеальности, среднего межчастичного расстояния системы пылевых частиц и средней кинетической энергии центра масс пылевой компоненты от параметров системы.

3. Схема передачи энергии в монослое пылевых частиц в плазме.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на конференциях: “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (МФТИ 2005-2010); “Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество” и “Уравнения состояния вещества” (Эльбрус 2008-2010); “Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах” (Новый Афон 2009-2011); Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем (Москва 2008-2010); EPS Conference on Plasma Physics (Dublin 2010, Strasbourg 2011); 6th Intern. Conference on the Physics of Dusty Plasmas (Garmisch-Partenkirchen 2011); 3rd Intern. Conference “Dusty Plasmas in Applications” (Odessa 2010); Workshop “Complex systems of charged particles and their interaction with electromagnetic radiation” (Moscow 2010-2011); Научно-коорд. “Исследования неидеальной плазмы” (Москва 2009-2010); 13th Intern. Workshop on the Physics of Non-Ideal Plasmas (Черноголовка 2009).

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в реферируемых научных журналах, а также в сборниках и тезисах российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, девяти глав и заключения, изложена на 96 страницах, включает 70 рисунков, 2 таблицы, библиографию из 64 наименований.

Содержание работы

Во введении даётся краткое обоснование актуальности, научной новизны и практической значимости задач, рассматриваемых в работе. Формулируются цели работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава имеет обзорный характер. Кратко описывается состояние исследований явления аномального разогрева движения пылевых частиц в плазме газового разряда. Рассмотрены работы, в которых предлагаются различные механизмы разогрева движения пылевых частиц. Показываются основные проблемы, возникающие при исследовании плазменно-пылевой системы. Кроме того, даётся обзор экспериментальных работ, затрагивающих проблему аномально высокой средней кинетической энергии пылевых частиц в плазме газового разряда. Глава I состоит из двух параграфов.

В разделе 1.1 даётся обзор механизмов разогрева движения пылевых частиц до аномально высоких энергий. Сначала рассматриваются механизмы, основанные на флуктуациях заряда пылевых частиц, и обсуждаются работы, связанные с моделированием систем пылевых частиц с флуктуирующим зарядом в плазме газового разряда. Затем рассматриваются механизмы, основанные на зависимости заряда пылинки от расстояния до электрода, на явлении конечного времени зарядки пылинки, и другие механизмы разогрева колебаний пылевых частиц. Указывается на затруднения, возникающие при сравнении предложенных теорий с экспериментом, и на то, что данные механизмы учитывают отдельные явления, а не совместное их влияние.

В разделе 1.2 рассматриваются экспериментальные работы, посвящённые исследованию явления аномального разогрева движения пылевых частиц в плазме газового разряда. Отдельно рассматриваются работы, посвящённые исследованию максвелловского распределения скоростей пылевых частиц по различным направлениям.

Вторая глава посвящена обсуждению модели системы пылевых частиц в плазме газового разряда. Сформулирована система уравнений, описывающая движение пылевых частиц в плазме газового разряда. Выявлены силы, которые определяют движение пылевых частиц, и обосновано пренебрежение другими силами. Чтобы избежать необходимости учитывать силу ионного увлечения скорректирован диапазон рассматриваемых параметров системы

пылевых частиц в плазме газового разряда. Отсутствие градиентов температуры в рассматриваемых лабораторных экспериментах позволило пренебречь теоремофоретической силой. Глава II состоит из одного параграфа.

Третья глава посвящена обсуждению параметров сил, определяющих движение пылевых частиц. Заряд пылевой частицы определяется потоками окружающей плазмы на поверхность пылинки, а окружающая плазма подвержена влиянию заряженной пылинки. Рассматривается зависимость заряда от времени и координат, зависимость электрического поля от расстояния до электрода. Обнаружено, что система уравнений сильно усложняется при учёте данных эффектов. Глава III состоит из трёх параграфов.

В **разделе 3.1** рассмотрены зависимость электрического поля от расстояния до электрода, зависимость заряда пылевой частицы от расстояния до электрода, от расстояния до других пылевых частиц, флуктуации заряда пылевой частицы. Предложены аналитические выражения для учёта перечисленных эффектов при расчёте сил, действующих на пылевые частицы.

В **разделе 3.2** дано описание того, как изменяются силы, действующие на пылевые частицы, при учёте зависимости электрического поля и заряда пылевой частицы от координаты и времени.

В **разделе 3.3** отмечено, что большинство сил зависит от положения пылинки и положения ближайших к ней пылинок, а также в силах присутствуют флуктуационные слагаемые, что приводит к зависимости сил от времени. Приведена итоговая система уравнений:

$$m\ddot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{F}_i^{inter}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{F}_i^{trap}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{F}_i^{fr}(\dot{\mathbf{r}}, t) + \mathbf{F}_i^{grav} + \mathbf{F}_i^{el}(\mathbf{r}, t), \quad i = 1 \dots N, \quad (1)$$

где \mathbf{F}^{inter} – сила взаимодействия пылевых частиц, \mathbf{F}^{trap} – сила ловушки, удерживающей частицы от разлёта по горизонтали, \mathbf{F}^{fr} – сила трения пылевых частиц о нейтральный газ, \mathbf{F}^{grav} – гравитационная сила, \mathbf{F}^{el} – сила, с которой вертикальное электрическое поле приэлектродного слоя разряда действует на заряженную пылевую частицу.

В **четвертой главе** приводится обсуждение модели и анализ результатов моделирования. Исследуются зависимость средней кинетической энергии, температур различных подсистем и других характеристик от параметров плазменно-пылевой системы. Глава IV состоит из четырёх параграфов.

В разделе 4.1 обсуждается модель системы пылевых частиц в плазме газового разряда, предназначенная для численного МД моделирования.

В рассматриваемой модели пылевая частица считается материальной точкой, обладающей зарядом и массой. Влияние плазмы газового разряда на пылевую частицу моделируется стохастическими флуктуациями заряда пылинки. Влияние приэлектродного слоя газового разряда моделируется зависимостью электрического поля и заряда пылевой частицы от расстояния до электрода. Влияние других заряженных пылевых частиц на окружающую плазму и, соответственно, на заряд пылевой частицы моделируется зависимостью заряда пылевой частицы от расстояния до других пылевых частиц.

Движение системы пылевых частиц, формирующих монослой, в приэлектродном слое газового разряда моделируется с помощью численного интегрирования системы уравнений (1) подобно тому, как это делается методом молекулярной динамики [3, 19, 22–24, 26]. Система уравнений (1) содержит 12 параметров: количество частиц N , масса m , ускорение свободного падения g , коэффициент трения пылинки о газ γ , заряд Q , нормированные градиенты заряда по вертикали и по радиусу q'_z и q'_r , нормированная амплитуда флуктуаций заряда δq , нормированный градиент электрического поля e'_z , характерная частота релаксации малых отклонений заряда Ω , параметр экранирования κ , параметр потенциала-ловушки ε .

Моделирование системы пылевых частиц проводится для трёх базовых наборов данных (табл. 1). Значения параметров в этих наборах данных соответствуют типичным параметрам экспериментов [4–15]. На стационарном участке траектории системы пылевых частиц рассчитывались средняя кинетическая энергия движения пылевых частиц K , кинетические температуры движения пылинок в горизонтальном K_h и вертикальном K_v направлениях, средняя кинетическая энергия движения центра масс системы пылевых частиц K_{cm} , среднее расстояние между пылинками $\langle \Delta r_{i,j} \rangle$, параметр неидеальности Γ , а также спектр колебаний системы пылевых частиц и её центра масс. Варьирование всех параметров системы по очереди позволяет исследовать характер зависимости указанных характеристик системы от каждого параметра. В результате получены аналитические зависимости указанных характеристик от рассматриваемых параметров.

Модельные значения параметров системы пылевых частиц

Параметры	Набор №1	Набор №2	Набор №3
Количество частиц N	7	7	9
Шаг интегрирования dt , с	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
Радиус пылинки a , 10^{-4} см	10.0	8.0	7.0
Плотность пылинки ρ , г/см ³	1.5	1.5	1.5
Ускорение свободного падения g , см/с ²	980	980	980
Коэффициент трения γ , с ⁻¹	1.0	3.0	2.0
Заряд пылинки Q , зар.эл.	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
Градиент заряда по вертикали q'_z , см ⁻¹	0.10	0.1	0.15
Градиент заряда по радиусу q'_r , см ⁻¹	-0.1	-0.1	-0.15
Амплитуда флуктуаций заряда δq	0.005	0.011	0.016
Градиент электрического поля e'_z , см ⁻¹	-40.0	-10.0	-20.0
Частота зарядки пылинки Ω , с ⁻¹	$4 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
Параметр экранирования κ , см ⁻¹	30.0	3.0	40.0
Параметр потенциала-ловушки ε , ед.СГСЭ	$8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$

В разделе 4.2 приведены результаты моделирования и обсуждается влияние параметров системы на среднюю кинетическую энергию вертикального движения пылевых частиц.

Выбор параметров системы уравнений (1) и последующее численное интегрирование позволяет определить влияние этих параметров на характеристики системы. Все параметры системы были разделены на две группы, влияющие на рассматриваемую характеристику и не влияющие.

Факторы, определяющие среднюю кинетическую энергию вертикального движения пылевых частиц.

1. Нормированная амплитуда флуктуаций заряда δq (рис. 1,а).
2. Коэффициент трения пылевой частицы об окружающий газ γ (рис. 1,б).
3. Характерная частота релаксации малых отклонений заряда Ω (рис. 1,в).
4. Масса пылевой частицы m (рис. 1,г).
5. Ускорение свободного падения g .

Факторы, не влияющие на среднюю кинетическую энергию вертикального движения: нормированный градиент электрического поля приэлектродного слоя e'_z , параметр потенциала-ловушки ε , заряд Q , количество пылинок N , нормированный градиент заряда по вертикали q'_z , нормированный градиент заряда по расстоянию между частицами q'_r , параметр экранирования κ . Результаты обобщаются соотношением

$$K_v \approx T_{room} + (1.0 \pm 0.1) \cdot a(N) \cdot m(g\delta q)^2 / (\gamma\Omega), \quad (2)$$

где T_{room} – температура нейтрального газа, которая для рассматриваемых условий приблизительно равна $300K$, $a(N)$ – коэффициент, отличающийся от единицы для малого числа частиц N . Все величины имеют размерность СГСЭ. Для наглядности на графиках кинетическая температура переведена в единицы эВ. Заметим, что эта формула с хорошей точностью одинакова для всех рассмотренных наборов данных.

В **разделе 4.3** обсуждаются результаты моделирования и влияние параметров системы на среднюю кинетическую энергию горизонтального движения пылинок.

Кинетическая температура горизонтального движения пылевых частиц обычно оказывается меньше кинетической температуры вертикального движения. Численное моделирование показало, что набор параметров, который определяет среднюю кинетическую энергию горизонтального движения, значительно отличается от набора параметров, определяющих среднюю кинетическую энергию вертикального движения частиц.

Факторы, определяющие среднюю кинетическую энергию горизонтального движения пылевых частиц.

1. Нормированная амплитуда флуктуаций заряда δq (рис. 1,а).
2. Коэффициент трения пылевой частицы об окружающий газ γ (рис. 1,б).
3. Нормированный градиент электрического поля приэлектр. слоя e'_z .
4. Параметр потенциала-ловушки ε .
5. Заряд пылинки Q .

Заметим, что средняя кинетическая энергия горизонтальных колебаний в основном определяется первыми двумя факторами, а следующие три фактора влияют на кинетическую температуру в гораздо меньшей степени.

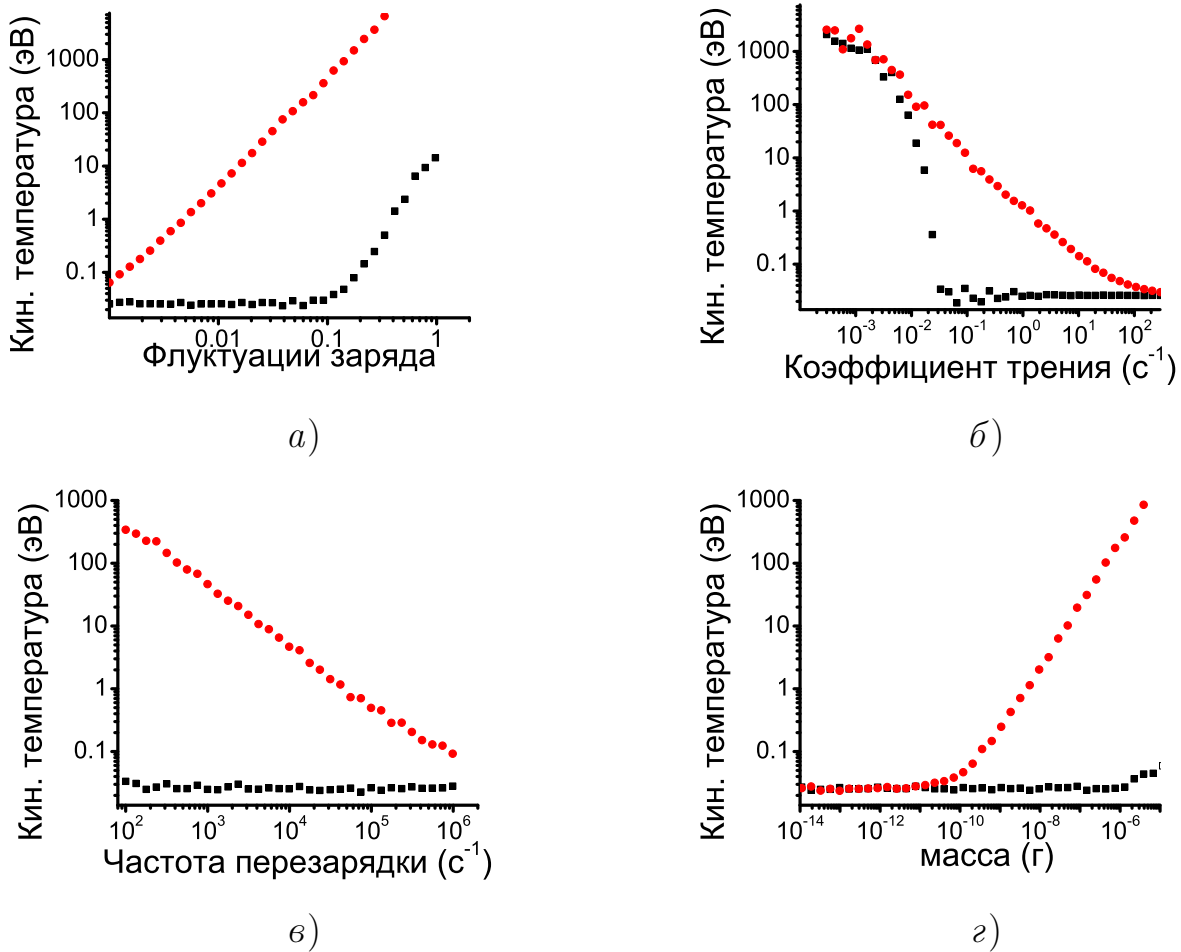


Рис. 1. Зависимость характеристик от параметров для набора №1:

кружки – кинетическая температура вертикального движения пылевых частиц; квадраты – кинетическая температура горизонтального движения пылинок. Параметры: а – нормированная амплитуда флуктуаций заряда пылевой частицы, б – коэффициент силы трения пылевой частицы о нейтральный газ, в – характерная частота зарядки пылевой частицы, г – масса пылевой частицы

Факторы, не влияющие на среднюю кинетическую энергию горизонтального движения: характерная частота зарядки пылевых частиц Ω (рис. 1,в), масса пылевой частицы m (рис. 1,г), ускорение свободного падения g , параметр экранирования κ , количество пылевых частиц N , нормированные градиенты заряда по вертикали и по расстоянию между частицами q'_z и q'_r .

Другим отличием горизонтальной кинетической температуры от вертикальной является пороговый характер зависимости от параметров. Для значительного диапазона параметров она сохраняет приблизительно постоянное значение (температуры нейтрального газа), а при достижении определённого значения параметра начинает резко увеличиваться (рис. 1,б).

В разделе 4.4 приведены результаты моделирования и обсуждается влияние параметров системы на параметр неидеальности, среднее межчастичное расстояние и среднюю кинетическую энергию центра масс системы.

Получены зависимости параметра неидеальности Γ , средней кинетической энергии движения центра масс системы пылинок K_{cm} и среднего межчастичного расстояния $\langle \Delta r_{i,j} \rangle$. Зависимости этих характеристик от параметров системы получены для трёх наборов параметров (табл. 1)

$$\begin{aligned} 1: \quad \Gamma &\approx 1.0 + (13 \pm 1) \cdot N^{0.7} \varepsilon^{0.5} Q^{1.5} \cdot (\gamma \Omega / m (g \delta q)^2) / (\kappa + 24), \\ 2: \quad \Gamma &\approx 1.0 + (2.1 \pm 0.2) \cdot N^{0.7} \varepsilon^{0.65} Q^{1.33} \cdot (\gamma \Omega / m (g \delta q)^2) / (\kappa + 27), \\ 3: \quad \Gamma &\approx 1.0 + (8.4 \pm 0.8) \cdot N^{0.8} \varepsilon^{0.53} Q^{1.5} \cdot (\gamma \Omega / m (g \delta q)^2) / (\kappa + 40). \end{aligned} \quad (3)$$

Восстановление зависимости параметра неидеальности пылевой подсистемы (3) является сложной задачей, так как не всегда удаётся аппроксимировать полученную зависимость простой функцией. Поэтому в данной работе полученные зависимости аппроксимируются степенной функцией в окрестности точки, соответствующей набору параметров (табл. 1). Основная причина различия формул для разных наборов данных заключается в сложности системы: наличии стохастических и нелинейных слагаемых. В процессе изменения произвольного параметра зависимость характеристики от этого параметра может менять свой характер. Коэффициенты в (3) имеют такую размерность, чтобы в итоге характеристика получалась нужной размерности.

Формулы для среднего межчастичного расстояния:

$$\begin{aligned} 1: \quad \langle \Delta r_{i,j} \rangle &\approx (0.36 \pm 0.02) \cdot N^{-0.22} Q^{0.3} \varepsilon^{-0.3} / (\kappa + 156), \\ 2: \quad \langle \Delta r_{i,j} \rangle &\approx (0.8 \pm 0.1) \cdot Q^{0.17} \varepsilon^{-0.3} / (\kappa + 169), \\ 3: \quad \langle \Delta r_{i,j} \rangle &\approx (37 \pm 2) \cdot Q^{0.2} \varepsilon^{-0.25} / (\kappa + 231). \end{aligned} \quad (4)$$

Зависимость средней кинетической энергии центра масс системы пылевых частиц от параметров системы аппроксимируется точно и совпадает для трёх наборов параметров (табл. 1):

$$K_{cm} \approx (1.0 \pm 0.1) \cdot N^{-1} (T_{room} + m (g \delta q)^2 / (\gamma \Omega)). \quad (5)$$

Средняя кинетическая энергия центра масс, приходящаяся на одну пылевую частицу, с хорошей точностью оказывается равна средней кинетической энергии вертикального движения пылевых частиц, поделенной на число частиц.

В моделировании были использованы потенциал Юкавы и сумма двух экранированных кулоновских потенциалов [27]. Оказалось, что спектр колебаний пылевых частиц и средняя кинетическая энергия вертикальных колебаний практически не зависят от параметра экранирования и вида потенциала в выбранном диапазоне параметров. Это связано с тем, что при наличии вынужденных колебаний в системе с трением собственные колебания затухают. Таким образом, моделирование показывает независимость спектра колебаний пылевых частиц от потенциала взаимодействия пылинок в рамках выбранной модели для случая “разогретых” пылевых частиц.

В **пятой главе** обсуждается вопрос о применимости термина “температура” для описания системы пылевых частиц в плазме газового разряда. Глава V состоит из двух параграфов.

В **разделе 5.1** проводится исследование вопроса применимости термина “температура” для описания системы пылевых частиц в газовом разряде.

Обсуждается соответствие средней кинетической энергии пылевых частиц понятию температуры. В ходе моделирования было обнаружено, что система пылевых частиц приходит к частичному равновесию (термин “температура” для состояния частичного равновесия использовать можно). За время, меньшее нескольких периодов колебаний пылинок, распределение скоростей пылевых частиц становится максвелловским, соответствующим параметру распределения T_{Maxw} . Максвеллизация распределения скоростей пылевых частиц объясняется воздействием двух стохастических процессов на систему: столкновениями с нейтральной компонентой и флуктуациями заряда пылевых частиц. Показано, что в случае, когда средняя кинетическая энергия пылевых частиц существенно превышает температуру нейтрального газа, основную роль играют стохастические флуктуации заряда пылевой частицы, характеризующиеся шумовой температурой $T_{noise} = m(g\delta q)^2/(\gamma\Omega)$. Было показано, что шумовая температура совпадает с параметром распределения Максвелла $T_{Maxw} \approx T_{noise}$, что даёт основание называть среднюю кинетическую энергию пылевых частиц температурой.

В **разделе 5.2** обсуждается разделение понятий температуры вертикального и горизонтального движения пылевых частиц в газовом разряде.

Типичный лабораторный эксперимент обладает существенной асиммет-

рией из-за наличия выделенных направлений силы тяжести и расположения электродов газового разряда. По этой причине горизонтальная и вертикальная температуры пылевых частиц при определённых диапазонах параметров могут существенно отличаться. Таким образом, систему пылевых частиц необходимо разделить на две подсистемы, находящиеся в частичном равновесии. Для каждой подсистемы можно ввести понятие температуры. Подобная ситуация с разделением температур для различных подсистем встречается достаточно часто. Например, в неравновесной низкотемпературной плазме выделяют поступательную, колебательную, вращательную и другие виды температуры. Если распределения скоростей горизонтального и вертикального движения начинают совпадать, то можно говорить о температуре пылевой компоненты без деления на дополнительные подсистемы.

В **шестой главе** исследуется влияние различных слагаемых системы уравнений (1) на характеристики плазменно-пылевой системы. Определяется их вклад в разогрев вертикального и горизонтального движения пылинок. Глава VI состоит из двух параграфов.

В **разделе 6.1** рассматриваются силы, влияющие на вертикальное движение пылевой частицы.

Система уравнений (1) описывает движение пылевых частиц в плазме приэлектродного слоя газового разряда. Решить эту систему уравнений аналитически не позволяет наличие различных стохастических и нелинейных слагаемых, поэтому разделим систему на части и упростим до доступного для анализа вида. Уравнение для движения одиночной пылевой частицы в вертикальном направлении можно упростить до вида:

$$\ddot{z} \approx -2\gamma\dot{z} + g(q'_z + e'_z)z + gq'_ze'_zz^2 + g\delta q(t) + g\delta q(t)e'_zz. \quad (6)$$

Первое слагаемое уравнения (6) позволяет найти первое приближение частоты колебаний пылевой частицы: $\omega_z = \sqrt{-g(e'_z + q'_z)}$. Это выражение является только первым приближением, потому что на величину частоты повлияют также нелинейные слагаемые и другие члены уравнения.

Рассмотрим влияние стохастической силы, не зависящей от координаты, на классический осциллятор с трением:

$$\ddot{z} + 2\gamma\dot{z} + \omega_z^2 z \approx g\delta q(t). \quad (7)$$

Стохастическое уравнение (7) с учётом нормального распределения величины $\delta q(t)$ позволяет оценить кинетическую температуру системы:

$$K_z = \langle mv^2/2 \rangle \approx m (g \cdot \delta q)^2 / (\gamma \cdot \Omega). \quad (8)$$

Формула (8) практически совпадает с аппроксимационной формулой (2), полученной с помощью моделирования. Отличие связано с влиянием слагаемых уравнения (6), которые не были учтены в уравнении (7).

Совместное влияние нелинейного слагаемого $gq'_z e'_z z^2$ и стохастической силы $g\delta q(t)$ на линейный осциллятор может привести к развитию стохастического резонанса. Отмечается возможность взаимодействия резонансных явлений. Все эти явления практически не поддаются аналитической оценке, но численное моделирование позволяет учесть их влияние в совокупности.

В **разделе 6.2** исследуется влияние различных слагаемых системы уравнений на характеристики плазменно-пылевой системы. Определяются слагаемые, которые вносят наиболее значительный вклад в разогрев горизонтального движения пылевых частиц. При учёте взаимодействия с ближайшими пылинками разложение в ряд Тейлора позволяет выделить основное стохастическое слагаемое $[\langle Q \rangle^2 e^{-\kappa \langle \Delta r_{ij} \rangle} (\kappa \langle \Delta r_{ij} \rangle + 1) / m \langle \Delta r_{ij} \rangle^2] \delta q(t)$. Это стохастическое слагаемое может приводить к разогреву горизонтальных колебаний точно также, как и слагаемое $g\delta q(t)$ разогревает вертикальные колебания. Однако эффект этого слагаемого оказывается пренебрежимо мал для рассматриваемых условий лабораторного эксперимента.

В **седьмой главе** предлагается механизм переноса энергии между вертикальными и горизонтальными колебаниями пылевых частиц. Глава VII состоит из трёх параграфов.

В **разделе 7.1** предлагается ряд упрощений системы (1) для приведения к виду, доступному для анализа, и их обоснование.

Взаимодействие с пылевыми частицами моделируется взаимодействием с двумя неподвижными заряженными точками на одной горизонтальной линии. Такая модель позволяет учесть большинство эффектов, появляющихся из-за взаимодействия с другими пылинками в монослое. Используется метод разложения сил, действующих на пылинку, в ряд Тейлора с учётом малости амплитуды колебаний по сравнению со средним межчастичным расстоянием.

В разделе 7.2 обсуждается возможность развития параметрического резонанса. Система уравнений движения, в которой оставлены только самые значимые слагаемые, выглядит так

$$\begin{cases} \ddot{x} = -a_1x + a_4xz^2 + \dots - 2\gamma\dot{x} \\ \ddot{z} = -b_1z + b_4zx^2 + \dots - 2\gamma\dot{z}. \end{cases} \quad (9)$$

Независимость вертикального и горизонтального движения пылевых частиц (из-за стохастических членов в уравнении движения) позволяет подставить гармонику вертикального движения в уравнения горизонтального движения:

$$\ddot{x} \approx -\omega_x^2(1 - h_x \cos(2\omega_z t))x + \dots, \quad (10)$$

где $h_x = a_4A_z^2/2\omega_x^2$, $\omega_x^2 = a_1 - a_4A_z^2/2 + \dots$. Форма уравнения (10) совпадает с формой уравнения Матье, что указывает на возможность развития параметрического резонанса при определённых условиях. Показано, что диапазоны частот вертикальных и горизонтальных колебаний могут пересекаться. Направление переноса энергии определяется тем, что из-за флуктуаций заряда пылинок кинетическая температура вертикального движения пылевых частиц оказывается значительно больше температуры горизонтального движения пылевых частиц. Условие развития параметрического резонанса представляется в виде $\gamma < a_4A_z^2/8\omega_z$. В этом случае амплитуда горизонтальных колебаний увеличивается за счёт вертикальных колебаний.

В разделе 7.3 рассматриваются ситуации, когда механизм, основанный на параметрическом резонансе, осуществляется и приводит к двум противоположно направленным потокам энергии. Рассмотрение баланса этих потоков энергии позволяет оценить связь амплитуд вертикальных и горизонтальных колебаний пылевых частиц в состоянии равновесия.

Второй параметрический резонанс может возникнуть при $\gamma < b_4A_x^2/8\omega_x$. Этот резонанс приводит у обратному процессу перекачки энергии от горизонтальных колебаний к вертикальным. В указанном случае условие равновесия потоков энергии позволяет обнаружить связь амплитуд вертикальных и горизонтальных колебаний

$$A_z^2 - A_x^2 \approx \gamma\omega_z/b_4 > 0. \quad (11)$$

Восьмая глава посвящена обсуждению схемы переноса энергии в плазменно-пылевой системе. Глава VIII состоит из одного параграфа.

Предложена общая схема разогрева (рис. 2). Внешний источник поддерживает газовый разряд и плазму, которая в свою очередь обеспечивает флуктуации заряда пылевой частицы. Флуктуации заряда приводят к появлению эффективной вынуждающей силы. Благодаря пересечению частотных диапазонов вынуждающей силы и собственных вертикальных колебаний пылинки становится возможна накачка вынуждающей силой энергии в вертикальное и горизонтальное движение пылевых частиц. Большие амплитуды колебаний пылевой частицы приводят к появлению нелинейных членов в разложении сил, действующих на частицы. В силу наличия ближнего порядка в системе пылевых частиц, нелинейных эффектов, пересечения частотных диапазонов вертикальных и горизонтальных колебаний появляется параметрический резонанс, поддерживающий обмен энергией между горизонтальными и вертикальными колебаниями. Заметим, что накачка горизонтальных колебаний происходит на частоте вертикальных колебаний и на частоте, отличающейся от неё в два раза, а частота вертикальных колебаний определяется в основном параметрами приэлектродного слоя. Потеря энергии движения пылевых частиц происходит из-за столкновений с частицами окружающего газа. Столкновения пылевых частиц и частиц газа не приводят к нагреву газа, так как из-за малого значения давления газа его частицы теряют лишнюю энергию при столкновениях со стенкой. Баланс потери энергии пылевой частицы за счёт трения о нейтральный газ и притока энергии из-за резонансных явлений определяет амплитуду и кинетическую энергию пылевой частицы.

В **девятой главе** приводится сравнение результатов теоретического анализа с экспериментом. Глава IX состоит из четырёх параграфов.

В **разделе 9.1** проводится сравнение зависимости амплитуды колебаний пылевых частиц от давления с экспериментальными данными.

Зависимость амплитуды $A_z \approx \langle v_z \rangle / \omega_z \approx \sqrt{2g(\delta q)^2 / (\gamma\Omega(-e'_z))}$ от давления нейтрального газа определяется зависимостями от давления параметров, входящих в это выражение. В работе [12] была измерена зависимость амплитуды колебаний пылинок от давления нейтрального газа и мощности газового разряда. Аппроксимация экспериментальных данных [12] (рис. 3) подтверждает



Рис. 2. Схема переноса энергии в системе пылевых частиц в плазме приэлектродного слоя газового разряда

полученную зависимость $A_z \propto p^{-1,5}$ и даёт зависимость амплитуды колебаний от мощности разряда $A_z(p, W)_{[mm]} \approx (-0.9 + 145W_{[W]}^{-1,0}) \cdot p_{[Pa]}^{-1,5}$. Преобладание вертикальной амплитуды над горизонтальной [12] согласуется с результатами моделирования (рис. 1) и формулой (11).

В разделе 9.2 проводится сравнение зависимости средней кинетической энергии пылевых частиц от давления с экспериментальными данными. Зависимость $T = T_n + A \cdot p_{Pa}^{-6}$ горизонтальной кинетической температуры пылевых частиц от давления нейтрального газа разряда, полученная на основе результатов работы [25], совпадает с аналогичной зависимостью, полученной с помощью моделирования (рис. 1).

В разделе 9.3 проводится сравнение частоты колебаний пылевых частиц с экспериментальными данными. Формула $\omega_z = \sqrt{-g(e'_z + q'_z)}$ позволяет оценить диапазон значений частоты колебаний $\omega_z \approx 20 \div 170$ рад/с, который может быть уменьшен при более детальном анализе приэлектродного слоя для конкретного газового разряда. Экспериментальные данные по частотам колебаний пылевых частиц попадают в полученный диапазон частот. Моде-

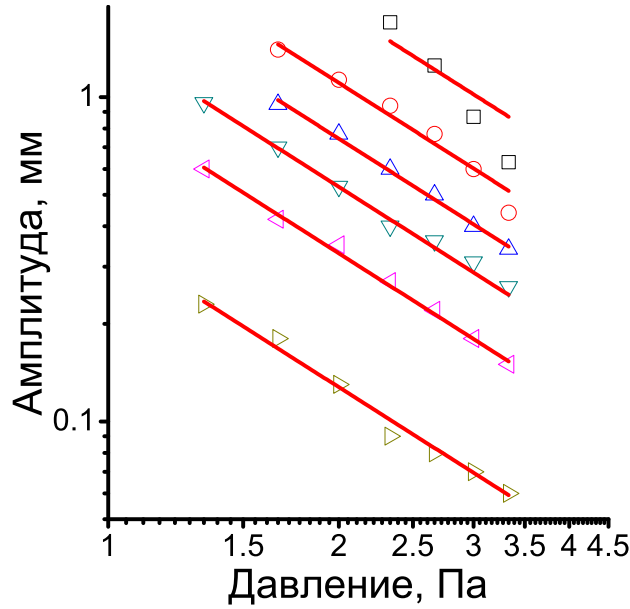


Рис. 3. Амплитуда вертикальных колебаний пылевой частицы при различных давлениях нейтрального газа разряда p и различных мощностях разряда W . Экспериментальные данные при разных мощностях разряда:

квадраты – 20 Вт, кружки – 35 Вт, треуг. вверх – 50 Вт, треуг. вниз – 65 Вт, треуг. влево – 80 Вт, треуг. вправо – 100 Вт. Сплошные кривые – аппроксимация экспериментальных

$$\text{данных } A_z(p, W)_{[\text{мм}]} = (-0.9 + 145W_{[\text{Вт}]}^{-1.0}) \cdot p_{[\text{Па}]}^{-1.5}$$

лирование даёт частоты колебаний из того же диапазона. Частота основной гармоники вертикальных колебаний пылевых частиц при численном моделировании оказывается очень близка к значению, полученному по приведённой формуле. Анализ спектров колебаний пылевых частиц даёт зависимость частоты колебаний пылевых частиц от g , e'_z , q'_z , которая согласуется с формулой, полученной на основе анализа системы уравнений движения.

В разделе 9.4 проводится сравнение кинетической температуры пылевых частиц с экспериментами для однослойной [10, 13] и многослойной [4, 25] пылевых структур. Для случая однослойной структуры [10, 13] значения кинетической температуры оказываются в рамках полученного в данной работе диапазона возможных значений. Оценена величина $\delta q^2/\Omega$ на основе сравнения численной оценки кинетической температуры по формуле (2) с экспериментальными данными. Для многослойной пылевой структуры расхождение оценки и экспериментальных значений указывает на наличие различий между механизмами, рассмотренным в данной работе, и механизмами, реализующимся в многослойной пылевой структуре.

Основные результаты и выводы работы

Сформулированы уравнения движения пылевых частиц в газовом разряде с учётом флуктуаций заряда и особенностей строения приэлектродного слоя. Рассмотрено совместное влияние различных сил и явлений на динамику системы пылевых частиц. Предложен подход, основанный на варьировании параметров в МД моделировании, который позволяет определять зависимость характеристик системы от её параметров.

1) Выявлено, что вертикальная кинетическая температура зависит только от пяти параметров: массы m , ускорения свободного падения g , коэффициента трения пылевой частицы о нейтральный газ γ , нормированной амплитуды флуктуаций заряда δq и характерной частоты зарядки пылевой частицы Ω . Предложена формула, описывающая зависимость вертикальной кинетической температуры от параметров системы $K_v \approx T_{room} + (1.0 \pm 0.1) \cdot a(N) \cdot m(g\delta q)^2/(\gamma\Omega)$. Показано, что горизонтальная кинетическая температура определяется другими пятью параметрами: нормированной амплитудой флуктуаций заряда δq , коэффициентом трения пылевой частицы о нейтральный газ γ , нормированным градиентом электрического поля приэлектродного слоя e'_z , параметром потенциала-ловушки ε , зарядом пылинки Q .

2) В нескольких типичных случаях получены аппроксимационные формулы для параметра неидеальности и межчастичного расстояния вида

$$\Gamma \approx 1.0 + (1.4 \pm 0.1)10^{-13} \cdot (N^{0.7}\varepsilon^{0.5}Q^{1.5}/(\kappa + 24)) \cdot (\gamma\Omega/m(g\delta q)^2),$$
$$\langle \Delta r_{i,j} \rangle \approx (0.36 \pm 0.02) \cdot N^{-0.18}Q^{0.3}\varepsilon^{-0.33}/(\kappa + 156)$$

и общая формула для средней кинетической энергии центра масс

$$K_{cm} \approx (1.0 \pm 0.1) \cdot N^{-1}(T_{room} + m(g\delta q)^2/(\gamma\Omega)).$$

3) Предложена схема передачи энергии от газового разряда к вертикальному движению пылевых частиц, далее к горизонтальному и далее в окружающий газ. На основе параметрического резонанса построен механизм переноса энергии от вертикальных колебаний пылевых частиц к горизонтальным и обратно, объясняющий аномальный разогрев движения пылевых частиц. Предложена формула $A_z^2 - A_x^2 \approx \gamma\omega_z/b_4$, связывающая амплитуды вертикальных и горизонтальных колебаний.

Публикации автора по теме диссертации

В реферируемых научных журналах:

Норман Г.Э., Стегайлов В.В., Тимофеев А.В. Аномальная кинетическая энергия системы пылевых частиц в плазме газового разряда // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. В. 5. С. 1017–1032.

Norman G.E., Timofeev A.V. Kinetic temperature of dust particle motion in gas-discharge plasma // Physical Review E. 2011. V. 84. N. 5. P. 056401[13 pages].

Norman G.E., Stegailov V.V., Timofeev A.V. Abnormal kinetic energy of charged dust particles in plasmas // Contributions to Plasma Physics. 2010. V. 50. N. 1. P. 104-108.

Тимофеев А.В. “Аномальная” кинетическая температура и особенности динамики пылевой плазмы // Труды МФТИ. 2009. Т. 1. №1. С. 104-110.

В сборниках статей:

Норман Г.Э., Стегайлов В.В., Тимофеев А.В. Применение теории параметрического резонанса к исследованию явлений в пылевой плазме. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. С. 1-5.

Norman G.E., Timofeev A.V. The energy exchange between the discharge, vertical and horizontal oscillations of dust particles // Proc.3-rd International Conference on Dusty plasmas in applications August 2010, Odessa. P. 131-134.

Norman G.E., Stegailov V.V., Timofeev A.V. Abnormal kinetic energy of charged dust particles in gas-discharge plasma // Physics of Extreme States of Matter. 2010. P. 187-189.

Норман Г.Э., Стегайлов В.В., Тимофеев А.В. Аномальная кинетическая энергия пылевых частиц в плазме газового разряда. // В сб. научных трудов школы семинара “АФМ-2009”. 2009. С. 149-154.

Тимофеев А.В. Кинетическая энергия пылевых частиц в газовом разряде. // В сб. Труды III научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”. 2010. Т. IV. С. 150-153.

Norman G.E., Stegailov V.V., Timofeev A.V. Kinetic temperature of the charged dust particle in nonideal dust plasma // Physics of Extreme States of Matter. 2009. P. 234-236.

Тимофеев А.В. Кинетическая энергия пылевых частиц в газоразрядной плазме // В сб. Труды I научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”. 2009. Т. IV. С. 173-177.

Норман Г.Э., Стегайлов В.В., Тимофеев А.В. Применение теории параметрического резонанса к исследованию явлений в пылевой плазме. // В сб. научных трудов школы семинара “АФМ-2008”. 2008. С. 121-126.

Норман Г.Э., Стегайлов В.В., Тимофеев А.В. “Аномальная” кинетическая температура и особенности динамики пылевой плазмы. // В сб. Труды I научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”. 2008. Т. IV. С. 178-180.

Литература

- [1] *Фортвов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А., Молотков В. И., Петров О. Ф.* // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
- [2] *Tsyтович V. N., Morfill G. E., Thomas H. M.* // Elementary Physics of Complex Plasmas. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008. 374 p.
- [3] *Ваулина О. С., Петров О. Ф., Фортвов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А.* // Пылевая плазма: эксперимент и теория. – М.: Физматлит, 2009. 316 с.
- [4] *Schweigert V. A., Schweigert I. V., et al.* // Phys. Rev. E. 1996. V. 54. N. 4. P. 4155.
- [5] *Melzer A., Homann A., Piel A.* // Phys. Rev. E. 1996. V. 53. N. 3. P. 2757–2766.
- [6] *Zhakhovskii V. V., Molotkov V. I., Nefedov A. P., Torchinskii V. M., Khrapak A. G., Fortov V. E.* // JETP Letters. 1997. V. 66. N. 6. P. 419–425.
- [7] *Schweigert V. A., Schweigert I. V., Melzer A., Homann A., Piel A.* // Phys. Rev. Letters. 1998. V. 80. N. 24. P. 5345–5348.
- [8] *Schweigert I. V., Schweigert V. A., et al.* // JETP. 1998. V. 87. N. 5. P. 905–915.
- [9] *Nunomura S., Misawa T., et al.* // Phys. Rev. Letters. 1999. V. 83. N. 10. P. 1970–1973.
- [10] *Quinn R. A., Goree J.* // Phys. Rev. E. 2000. V. 61. N. 3. P. 3033–3041.
- [11] *Quinn R. A., Goree J.* // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. N. 10. P. 3904.
- [12] *Samaritan A., James B., et al.* // Phys. Rev. E. 2001. V. 64. N. 2. P. 025402.
- [13] *Ivanov Y., Melzer A.* // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. N. 7. P. 072110.
- [14] *Schweigert V. A., Schweigert I. V., et al.* // Phys. Plasmas. 2002. V. 9. N. 11. P. 4465.
- [15] *Samsonov D., Zhdanov S. K., Quinn R. A., Popel S. I., Morfill G. E.* // Phys. Rev. Letters. 2004. V. 92. N. 25. P. 255004.
- [16] *Ivlev A. V., Konopka U., Morfill G. E.* // Phys. Rev. E. 2000 V. 62. N. 2. P. 2739–2744. .
- [17] *Wang Y.-N., Hou L.-J., Wang X.* // Phys. Rev. Letters. 2002. V. 89. N. 15. P. 155001.
- [18] *de Angelis U., Ivlev A. V., Morfill G. E., Tsyтович V. N.* // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. N. 5. P. 052301.
- [19] *Vaulina O., Repin A., Petrov O., Adamovich K.* // JETP. 2006. V. 102. N. 6. P. 986.
- [20] *Ivlev A., Zhdanov S., Klumov B., et al.* // Phys. Plasmas. 2005 V. 12. N. 9. P. 092104. .
- [21] *Marmolino C., de Angelis U., et al.* // Phys. Plasmas. 2009. V. 16. N. 3. P. 033701.
- [22] *Vaulina O. S., Khrapak S. A., Nefedov A. P., Petrov O. F.* // Phys. Rev. E. 1999. V. 60. N. 5. P. 5959–5964.
- [23] *Vaulina O. S., Samaritan A. A., James B., Petrov O. F., Fortov V. E.* // JETP. 2003. V. 96. N. 6. P. 1037–1044.
- [24] *Vaulina O. S., Vladimirov S. V., et al.* // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. N. 1. P. 012111.
- [25] *Melzer A., Schweigert V. A., Schweigert I. V., Homann A., Peters S., Piel A.* // Phys. Rev. E. 1996. V. 54. N. 1. P. 46–49.
- [26] *Антипов С. Н., Асиновский Э. И., Кириллин А. В., Майоров С. А., Марковец В. В., Петров О. Ф., Фортвов В. Е.* // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. С. 948–956.
- [27] *Филлипов А. В., Загородный А. Г., Момот А. И., Паль А. Ф., Старостин А. Н.* // ЖЭТФ. 2007. Т. 131 В. 1. С. 164–179.

Типография «Ол Би Принт»

Москва, Ленинский пр-т, 37

Тираж 130 экз.