

УДК 534-13
DOI:

Оригинальная статья

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ СИНТЕЗИРОВАННЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ

Р. В. Сеношенко*, Ф. М. Трухачев, Е. А. Кононов, М. М. Васильев, О. Ф. Петров

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия, Российская Федерация

**E-mail: senoshenko@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования волновых процессов в системе микрочастиц, синтезированных непосредственно в плазме тлеющего разряда постоянного тока. Качественно определены основные характеристики наблюдаемой пыле-акустической неустойчивости. Показано, что по мере увеличения концентрации и размера облака частиц наблюдается эволюция волны (значительно меняются такие характеристики, как длина волны, частота, скорость), а также зарегистрировано изменение кинетической энергии частиц. Возможными механизмами волновой эволюции являются увеличение плотности системы, усиление межчастичного взаимодействия, изменение параметров плазмы в объеме облака.

Ключевые слова: активная материя, коллоидная плазма, волны, синтез частиц в плазме

Финансирование. Данная работа выполнена при поддержке текущего институтского финансирования. Дополнительного финансирования для проведения данного исследования не привлекалось.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ссылка для цитирования: Сеношенко Р.В., Трухачев Ф.М., Кононов Е.А., М.М. Васильев, Петров О.Ф. Волновые процессы в системе синтезированных броуновских частиц // Теплофизика высоких температур / High Temperature. 2026. Т. 64. № 1. С. 1–5. <http://doi.org/...>

(с) Сеношенко Р.В., Трухачев Ф.М., Кононов Е.А., М.М. Васильев, Петров О.Ф.

UDC 534-13

DOI:

Original Article

WAVE PROCESSES IN A SYSTEM OF SYNTHESIZED BROWNING PARTICLES

R. V. Senoshenko*, **F. M. Trukhachev**, **E. A. Kononov**, **M. M. Vasiliev**, **O. F. Petrov**

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**E-mail: senoshenko@mail.ru*

Abstract. This paper presents the results of an experimental study of wave processes in a system of microparticles synthesized directly in a DC glow discharge plasma. The main characteristics of the observed dust-acoustic instability have been qualitatively determined. It is shown that as the concentration and size of the particle cloud increase, wave evolution occurs (characteristics such as wavelength, frequency, and velocity change significantly), and a change in the kinetic energy of the particles has also been observed. Possible mechanisms for wave evolution include an increase in system density, enhanced interparticle interactions, and changes in plasma parameters within the cloud volume.

Keywords: active matter, colloidal plasma, waves, particle synthesis in plasma

Funding. This work was supported by ongoing institutional funding. No additional grants to carry out or direct this particular research were obtained.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For Citation: Senoshenko R.V., Trukhachev F.M., Kononov E.A., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Wavelet processes in a system of synthetic brown particles. *Teplofizika Vysokikh Temperatur / High Temperature*. 2026, vol. 64, no. 1, pp. 1-5 (In Russ.) <http://doi.org/...>

ВВЕДЕНИЕ

Динамика микрочастиц в газоразрядной плазме, в частности в тлеющем разряде постоянного тока, представляет значительный интерес для решения фундаментальных и прикладных задач. Спонтанное образование таких частиц наблюдается как в технологических процессах, так и в установках типа ИТЕР, где оно является побочным эффектом [1]. Приобретая значительный электрический заряд в плазме, частицы могут радикально изменять свои свойства, что влияет на их динамику [2, 3]. В частности, ансамбли коллоидных частиц проявляют способность к самоорганизации [4, 5]. При сообщении им дополнительной энергии извне, например при облучении лазером [6, 7] или под воздействием волн [8], частицы могут также приобретать свойства, характерные для активных броуновских частиц, преобразуя полученную энергию в собственное направленное движение. Микрочастицы могут эффективно рассеивать и поглощать электромагнитное излучение, что позволяет использовать методы лазерной диагностики для отслеживания их индивидуальной и коллективной динамики, также характерные времена изучаемых процессов лежат в удобном диапазоне измерений (от десятков до тысяч Пс). Указанные приобретенные свойства делают коллоидную плазму уникальным объектом для исследования [9].

Частицы в коллоидной плазме способны к самоорганизации в упорядоченные структуры различной размерности. При этом в таких структурах могут наблюдаться различные коллективные явления, включая фазовые переходы, образование вихревых потоков и волн [10, 11]. Одним из ключевых коллективных явлений в таких ансамблях, независимо от природы частиц, являются самовозбуждаемые пыле-акустические волны [12, 13]. Эти низкочастотные волновые возмущения кардинально влияют на стабильность и морфологию всей дисперсной структуры [14].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования волновых процессов в системе частиц, синтезированных непосредственно в плазме разряда постоянного тока. Изучена пыле-акустическая неустойчивость, самопроизвольно возникающая в облаке полидисперсных частиц. В частности, проанализирована временная эволюция неустойчивости, обусловленная увеличением концентрации синтезируемых частиц в пылевом облаке. Исследование подобных явлений открывает новые перспективы для управления процессами в

структурах синтезированных частиц и создания управляемых ансамблей, таких как рои микродронов, способных к выполнению заданных функций [15, 16].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент был проведен в вертикальной газоразрядной стеклянной трубке с горизонтальными аксиальными ответвлениями для катода и анода (рис. 1). Длина трубки составляла 1250 мм, а ее внутренний диаметр — 40 мм. Ответвления для катода располагались на расстоянии 40 мм от нижнего края трубки, а для анода — на 80 мм от верхнего края, при этом их длина составляла 50 и 100 мм соответственно. Нижний конец трубки был закрыт, а верхний подключен к вакуумной системе.

Вакуумная система включала последовательно соединенные форвакуумный и турбомолекулярный насосы, а также запорные вентили и модуль подачи газа, управляемые блоком контроля давления. Перед началом эксперимента из трубки полностью откачивалась атмосфера, после чего она заполнялась аргоном до рабочего давления 14.7 Па. В течение всего эксперимента давление в трубке поддерживалось постоянным, при этом в объем трубки постоянно подавался плазмообразующий газ со скоростью 1 ст.см³/мин для поддержания постоянного давления в вакуумной системе.

После заполнения трубки буферным газом между анодом и катодом зажигался разряд постоянного тока. На катод подавался потенциал 2 кВ, что приводило к формированию тлеющего разряда. Сила тока между электродами на протяжении всего эксперимента составляла 2.5 мА.

В нижней части трубки находилась диэлектрическая вставка (рис. 1), используемая для фиксации нижней страты положительного столба разряда и стабилизации потоков электронов и ионов по оси трубки. Материалом вставки являлся силикон — кремнийорганический эластомер, полимерная цепь которого может разрушаться при интенсивном воздействии ионов. В результате воздействия потока ионов на поверхность вставки происходила ее эрозия [17, 18]. При этом образовывалась пересыщенная газовая фаза распыленного материала вставки, из которой в дальнейшем конденсировались и росли коллоидные частицы, размер которых лежал в диапазоне от десятков нанометров до единиц микрометров. Синтезированные таким образом частицы заряжались и удерживались в электро-

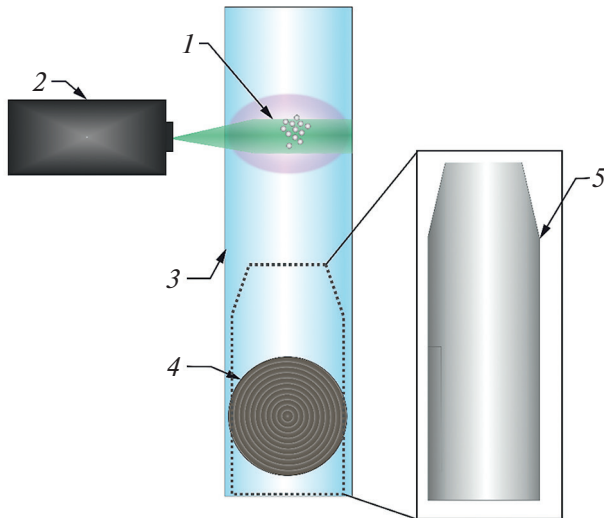


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — синтезированные частицы в первой страте газового разряда, 2 — лазер, 3 — газоразрядная трубка, 4 — катод, 5 — диэлектрическая вставка.

Fig. 1. Experimental setup: 1 — synthesized particles in the first stage of the gas discharge, 2 — laser, 3 — gas discharge tube, 4 — cathode, 5 — dielectric insert.

перпендикулярно оси газоразрядной трубки так, чтобы полностью подсвечивать содержимое первой страты. Интенсивность лазерного излучения составляла 0.2 Вт/см^3 обеспечивая регистрацию динамики частиц видеокамерой при минимальном воздействии на микрочастицы, и оставалась постоянной на протяжении всего эксперимента.

В ходе наблюдения за синтезированными частицами их движение регистрировалось высокоскоростной видеокамерой IDT-1440p. Частота съемки составляла 400 кадров в секунду, масштаб съемки — $14.52 \text{ мкм/пиксель}$. Полученные видеоданные анализировались с помощью специального программного обеспечения, что позволило получить координаты частиц на каждом кадре. Были построены их траектории, рассчитаны основные динамические характеристики и параметры пылеакустических волн.

Основные параметры коллоидной системы приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Начальная стадия процесса характеризовалась образованием конденсированной дисперсной фазы в страте тлеющего разряда при распылении материала вставки (рис. 2). Визуально этот этап проявлялся в виде возникновения устойчивой «дымки» в области страты, а в ее нижней части появлялись отдельно выделенные частицы, которые разряд сепарировал по массе по мере их роста. Последующее наблюдение за исследуемой коллоидной системой через фиксированные временные интервалы демонстрировало устойчивую тенденцию к увеличению как концентрации, так и среднего размера частиц в области страты.

Также первоначально наблюдалось возникновение пыле-акустической неустойчивости, достигавшей сильно нелинейной стадии, на что указывал захват частиц передним фронтом волны (рис. 2, красные стрелки). Волна распространялась сверху вниз по оси трубки, по мере ее движения она усиливалась. В начальный момент времени, когда облако частиц имело минимальный размер, а количество крупных частиц было невелико (десятки), в структуре прослеживался одиночный фронт волны, а частицы имели характерные признаки колебательного движения в вертикальном направлении. При этом на протяжении всего времени наблюдения радиальное движение частиц было незначительным и имело броуновский (случайный) характер, что указывало на первостепенную роль продольной пыле-

Параметры коллоидной системы Parameters of a colloidal system

Давление буферного газа, Па	14.7
Температура электронов, эВ	≈ 1
Температура ионов, эВ	≈ 0.03
Диаметр частиц, мкм	0.01–10
Плотность материала частиц, г/см^3	1.2
Средний заряд частиц, электрон	1200
Среднее межчастичное расстояние, мкм	180 на начальной стадии эксперимента, 80 на конечной
Сила тока разряда, мА	2.5
Напряжение, кВ	2
Эффективный диаметр частицы, мкм	1
Радиус Дебая, мкм	≈ 100
Пылевая плазменная частота, с^{-1}	180 на начальной стадии эксперимента, 600 на конечной

статическом поле первой страты над вставкой, формируя облако.

Для визуализации процессов, проходящих в первой страте, использовалась лазерная подсветка. Расширенный пучок лазера был направлен

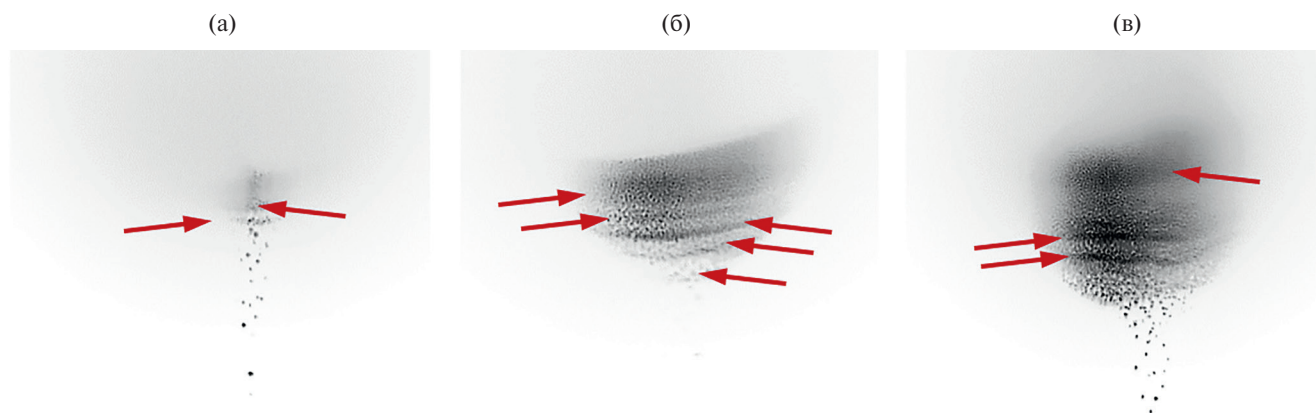


Рис. 2. Кадры видеозаписи с облаком синтезированных частиц по мере развития волны в структуре: (а) — 120 с, (б) — 300, (в) — 420, (г) — 600; стрелками указаны фронты волн.

Fig. 2. Video frames showing a cloud of synthesized particles as the wave propagates through the structure: (a) — 120 s, (b) — 300 s, (c) — 420 s, (d) — 600 s; arrows indicate the wave fronts.

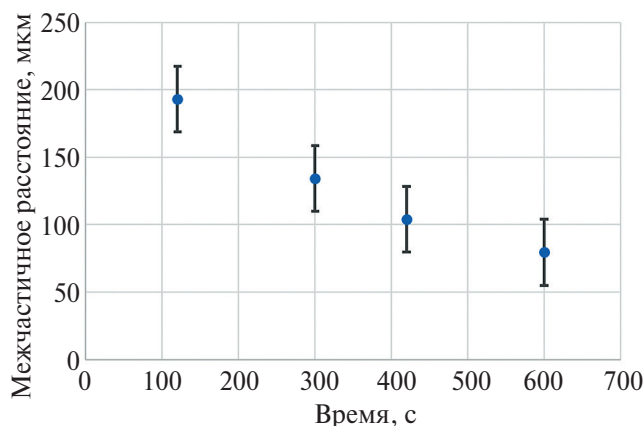


Рис. 3. Изменение среднего расстояния между частицами за время наблюдения.

Fig. 3. Change in the average distance between particles over the observation period.

акустической волны в динамике частиц. Волны во всех случаях можно считать плоскими в первом приближении.

По мере роста облака и числа крупных частиц (рис. 2а), в структуре наблюдалось уже два фронта волн. В момент достижения облаком границ страты в радиальном направлении сквозь структуру проходило более 5 волновых гребней (рис. 2б). При дальнейшем увеличении объема облака и числа частиц в нем количество прослеживаемых волновых фронтов уменьшалось до трех, что может быть связано с затуханием волновых процессов в связи с увеличением плотности структуры (рис. 3). Указанное явление, возможно, является следствием усиления электростатического взаимодействия частиц друг с другом.

В процессе роста пылевого облака наблюдалась эволюция волн, что проявлялось в изменении их характеристик. По восстановленным координатам частиц в системе были определены основные характеристики волн (рис. 4).

Как видно из рис. 4, частота волн до момента времени 420 с не изменяется в пределах погрешности. Но, когда число частиц становится достаточно большим, достигая границ страты, длина волны значительно возрастает (рис. 4б). По мере увеличения облака синтезированных частиц период волн уменьшался в два раза (рис. 4в). По анализу видеоданных рассчитана средняя скорость волн в системе для четырех наиболее характерных этапов (рис. 4г). С увеличением числа частиц в системе растет и скорость волны с резким скачком на временах около 420 с от начала наблюдения. Изменение скорости волны во времени согласуется с изменением длины волны, что может быть связано с перенасыщением системы синтезированными частицами и уменьшением межчастичного расстояния, т.е. увеличением силы межчастичного электростатического взаимодействия.

Для моделирования волновых свойств воспользуемся гидродинамической моделью:

$$N_e(\Phi) = \exp\left(\frac{e\Phi}{T_e}\right) \equiv \exp(\sigma_i\Phi), \quad (1)$$

$$N_i(\Phi) = \exp\left(-\frac{e\Phi}{T_i}\right) \equiv \exp(-\Phi), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_d}{\partial t} + v_d \frac{\partial v_d}{\partial X} = \frac{\partial \Phi}{\partial X}, \quad (3)$$

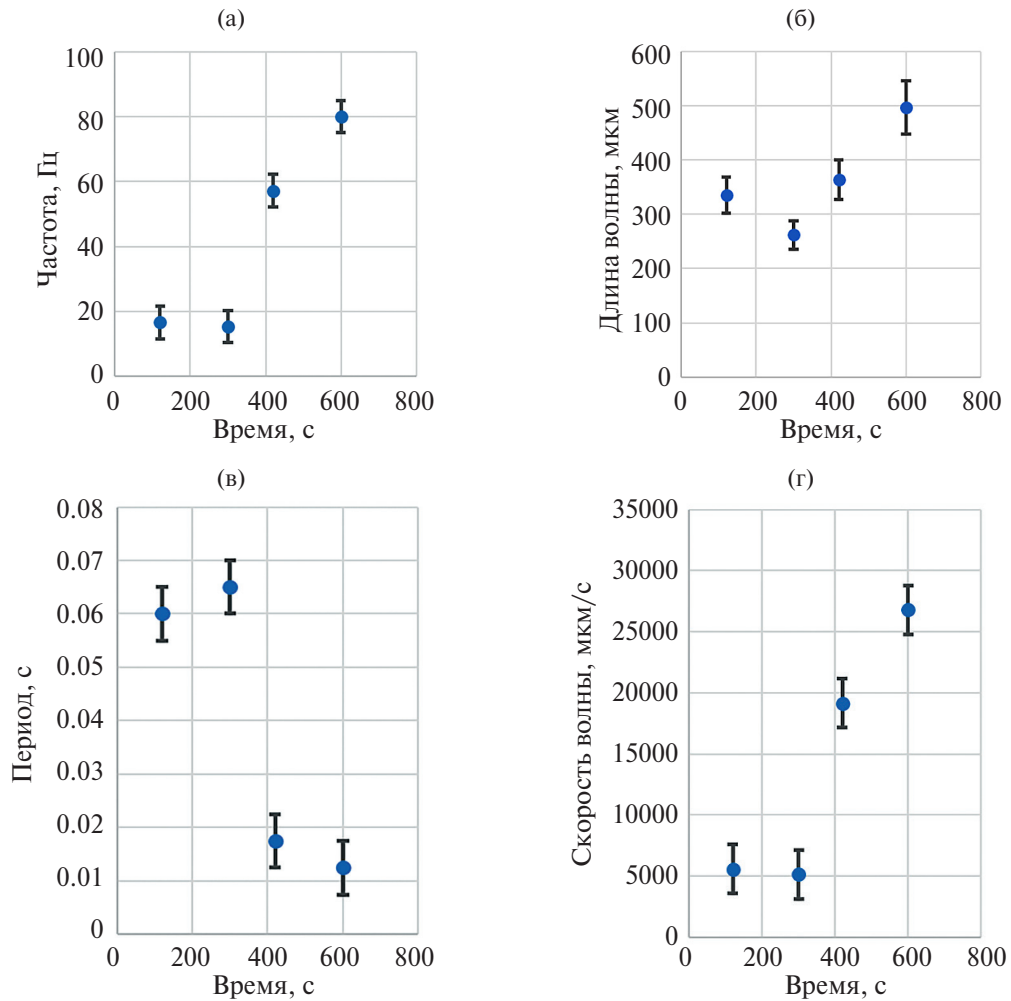


Рис. 4. Изменение характеристик волны в структуре синтезированных частиц по вертикальной оси от времени наблюдения: (а) — частота, (б) — длина волны, (в) — период, (г) — скорость волны.

Fig. 4. Changes in wave characteristics within the structure of synthesized particles along the vertical axis as a function of observation time: (a) — frequency, (b) — wavelength, (c) — period, (d) — wave velocity.

$$\frac{\partial N_d}{\partial t} + \frac{\partial N_d v_d}{\partial X} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} = \delta_e N_e - \delta_i N_i + N_d. \quad (5)$$

Здесь концентрации, начальные концентрации и нормированные концентрации заряженных частиц обозначены следующими символами: $n_j, n_{0j}, N_j = n_j/n_{0j}$, где $j = e, i, d$ соответствует электронам, ионам, коллоидным частицам; φ и $\Phi = e\varphi Z/T_i$ — потенциал и нормированный потенциал соответственно, где Z — безразмерный заряд пыли, $C_d = \sqrt{ZT_i/m_d}$ — пыле-акустическая скорость; $\delta_j = n_{0j}/(Zn_{0d})$. Условие квазинейтральности можно выразить соотношением $\delta_e - \delta_i + 1 = 0$; $\sigma_i = T_i/T_e$ и v_d — скорость дисперсной

фракции, нормированная на пыле-акустическую скорость C_d , пространственная и временная координаты нормированы на радиус Дебая и период плазменной частоты дисперсной фракции $X = x/\lambda_D, t = t\omega_d$, где $\lambda_D = \sqrt{T_i/4\pi Zn_{0d}e^2}$, $\omega_d = \sqrt{4\pi n_{0d}Z^2e^2/m_d}$. Все нормировки соответствуют работе [8]. В общем случае в уравнения (1)–(5) необходимо включить слагаемые, которые описывают давление, диссипацию, а также силу $F_{\text{амп}}$, которая компенсирует затухание волн (см., например, [19] для линейной задачи). Такой случай соответствует ситуации квазистационарного распространения пыле-акустической волны. Источником силы $F_{\text{амп}}$ являются внешние источники энергии, такие как ионные и электронные потоки, внешние электрические

поля, сила нейтрального увлечения и т.д. Однако в первом приближении ограничимся приведенной простой моделью. Линеаризуя систему (1)–(5), как показано в [20], можно получить дисперсионное соотношение

$$\omega = \frac{kC_d}{\sqrt{1+k^2\lambda_d^2}}.$$

Здесь ω , k — частота и волновое число пыле-акустической волны. Пыле-акустическую скорость можно переписать в виде $C_d = \omega_d \lambda_D$. Наличие пыле-акустических волн в облаке позволяет использовать их в качестве диагностики плазменных параметров. Как показано в работе [21], ширина профиля нелинейной пыле-акустической волны ΔN_d соизмерима с радиусом Дебая. Ширину профиля ΔN_d можно оценить по рис. 2а. Для нижнего профиля (нижняя красная стрелка) имеем оценку $\lambda_d \approx \Delta N_d \approx 100$ мкм. Значение пылевой плазменной частоты приведено в таблице. На рис. 5 показаны пыле-акустические дисперсионные кривые для начальной и конечной стадии эксперимента, а также отмечены измеренные частоты и длины волн.

Как видно из рис. 5, теоретическая модель хорошо описывает экспериментальные данные. На сегодняшний день известно несколько причин развития пыле-акустической неустойчивости: относительное движение заряженных пылевых частиц и частиц плазмы [22, 23], отно-

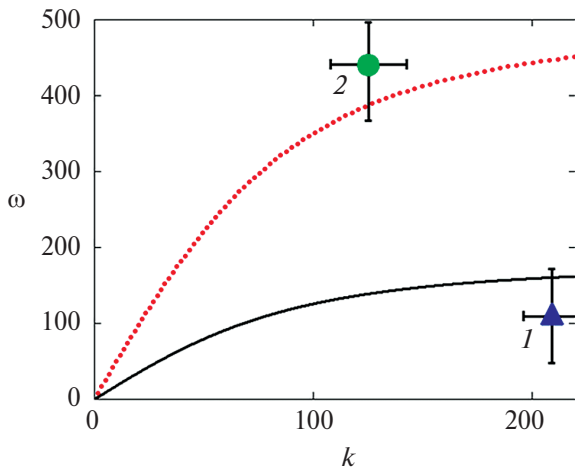


Рис. 5. Теоретические дисперсионные кривые для пыле-акустической волны в начальной стадии эксперимента (сплошная кривая) и его конечной стадии (пунктир): 1, 2 — соответствующие экспериментальные точки.

Fig. 5. Theoretical dispersion curves for a dust-acoustic wave in the initial stage of the experiment (solid curve) and its final stage (dotted line): 1, 2 — corresponding experimental data points.

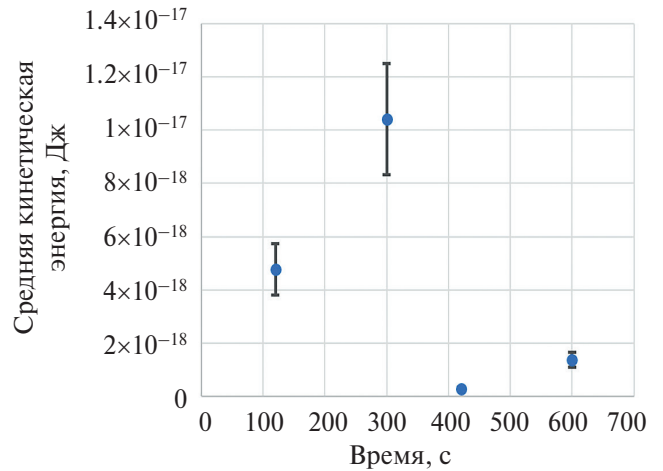


Рис. 6. Средняя кинетическая энергия коллоидных частиц.

Fig. 6. Average kinetic energy of colloidal particles.

сительное движение заряженных пылевых частиц и нейтральных частиц буферного газа [24], нелинейные и параметрические процессы [25] и др. По-видимому, наиболее вероятной причиной является первая из указанных. Действительно, в плазме тлеющего разряда постоянного тока всегда присутствуют встречные потоки ионов и электронов. Детальный анализ причин пыле-акустической неустойчивости является темой отдельных исследований.

Для расчета динамических характеристик частиц в системе было принято, что волна одномерная и распространяется только в вертикальном направлении. По соотношению $0.5m < v_y >^2$, где m — средняя масса частицы, v_y — ее скорость по вертикали, была рассчитана средняя кинетическая энергия для частиц, по которым находилась средняя кинетическая энергия в системе (рис. 6). Со временем экспозиции изменялась кинетическая энергия, приходящаяся на каждую частицу в системе. Наличие диссипативных механизмов и источника внешней энергии позволяет рассматривать волны как коллективную диссипативную структуру. Иначе говоря, при увеличении плотности частиц в облаке рассеяние энергии волны происходило более эффективно, в том числе за счет изменения электростатического взаимодействия между частицами.

Построены зависимости среднеквадратичного смещения от времени по вертикальной оси (рис. 7). Так как движение частиц в вертикальном направлении в основном обусловлено их захватом пыле-акустической неустойчивостью, то зависимости среднеквадратичного смещения от времени описывают динамику частиц при их

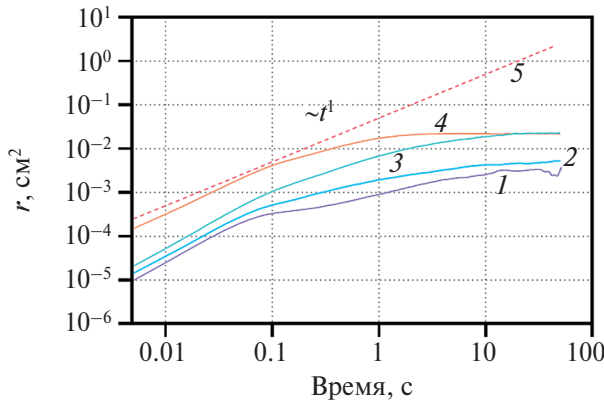


Рис. 7. Среднеквадратичное смещение $\langle r^2 \rangle$, усредненное по всем частицам при различных временах наблюдения: 1 – 120 с, 2 – 300, 3 – 420, 4 – 600, 5 – $\langle r^2 \rangle \sim t$ (для сравнения).

Fig. 7. Root-mean-square displacement $\langle r^2 \rangle$, averaged over all particles at various observation times: 1 – 120 s, 2 – 300, 3 – 420, 4 – 600, 5 – $\langle r^2 \rangle \sim t$ (for comparison).

движении в волне и релаксацию в своей электростатической ловушке, созданной соседними заряженными частицами, в дальнейшем.

Среднеквадратичное смещение на временах до ≈ 0.08 с описывает движение частиц в волновом фронте. Исходно возмущенные волной частицы двигались в режиме между баллистическим и диффузионным, когда наклон кривой среднеквадратичного смещения соответствует промежутку между t^2 и t^1 . Такой характер движения может соответствовать активному броуновскому [6, 26]. После возмущения частиц и их выхода из волнового фронта частицы двигались в диффузионном режиме ($\sim t^1$), рассеивая полученную от волны энергию. Видно, что изменяются времена перехода к диффузионному движению частиц и наклон зависимостей среднеквадратичного смещения, при этом абсолютные значения увеличиваются по мере изменения облака. Также видно, что частицы двигались ограниченно, достигая границ своей электростатической ловушки, образованной соседями, за разные времена — выход зависимостей среднеквадратичного смещения на постоянную величину происходил быстрее с увеличением концентрации частиц в облаке. Другими словами, частицы быстрее теряли энергию, передаваемую волной. При этом следует отметить, что при достижении облаком границ страты в радиальном направлении (рис. 2б, 2в) среднеквадратичные смещения частиц в нем достигают одинаковых значений.

Можно сделать вывод, что для неразвитого состояния облака синтезированных частиц, ког-

да их концентрация мала и их число невелико, переданная волной энергия позволяла двигаться частицам с большей средней скоростью. При увеличении концентрации частиц наблюдалось более эффективное рассеяние энергии, передаваемой волной частицам, приводя к уменьшению их средней скорости и электростатической ловушки, образованной соседями, при этом их смещение самой волной увеличивалось. Таким образом, с изменением структуры синтезированных частиц происходит как существенное изменение волновых процессов в ней, так и динамики частиц, возбуждаемых волной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе экспериментально наблюдалось формирование и развитие пыле-акустической неустойчивости в облаке синтезированных частиц в нижней страте положительного столба тлеющего разряда постоянного тока.

Частицы конденсировались из пересыщенной газовой фазы материала специальной вставки, распыленного потоком ионов газового разряда, и имели размеры от десятков нанометров до нескольких микрометров. Синтезированные частицы формировали в первой страте над вставкой облако. В ходе эксперимента концентрация частиц и само облако непрерывно увеличивались.

В сформированном облаке исходно возникала пыле-акустическая неустойчивость, достигавшая сильно нелинейной стадии и захватывавшая частицы передним фронтом волны. По мере изменения облака синтезированных частиц изменялись и характеристики волнового процесса. Показано, что с увеличением концентрации частиц в облаке волновые параметры эволюционируют в значительной степени. Причем для состояния системы с максимальной концентрацией частиц наблюдается существенное (в разы) уменьшение таких параметров как длина волны, период и скорость волны. Также показано, что при увеличении облака кинетическая энергия частиц в нем уменьшается, а скорость диссипации энергии, передаваемой волной частицам, растет. Наблюдаемые изменения пыле-акустической неустойчивости соответствуют изменению зависимостей среднеквадратичного смещения синтезируемых частиц для рассматриваемых этапов развития структуры.

Сделан вывод, что с увеличением облака частиц изменялось как взаимодействие между частицами в нем, так и электростатическая ловушка, ограничивавшая движение каждой частицы в структуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klumov B., Huber P., Vladimirov S., Thomas H., Ivlev A., Morfill G., Fortov V., Lipaev A., Molotkov V. Structural Properties of 3D Complex Plasmas: Experiments Versus Simulations // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2009. V. 51. P. 124028.
2. Karasev V.Y., Polischuk V.A., Dзлиева E.S., Pavlov S.I., Gorbenko A.P. About the Mechanism of Modification of Melamine Formaldehyde Particles in Dusty Plasmas // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1556. P. 012080.
3. Mitic S., Pustyl'nik M.Y., Morfill G.E. Spectroscopic Evaluation of the Effect of the Microparticles on Radiofrequency Argon Plasma // *New J. Phys.* 2009. V. 11. P. 083020.
4. Kononov E.A., Senoshenko R.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Active Brownian Motion of Emulsion Droplets Driven by Nanoscale Effects under Laser Irradiation // *Phys. Fluids*. 2024. V. 36 P. 117145.
5. Petrov O.F., Statsenko K.B., Vasiliev M.M. Active Brownian Motion of Strongly Coupled Charged Grains Driven by Laser Radiation in Plasma // *Sci. Rep.* 2022. V. 12. P. 8618.
6. Bechinger C., Di Leonardo R., Löwen H., Reichhardt C., Volpe G., Volpe G. Active Particles in Complex and Crowded Environments // *Rev. Mod. Phys.* 2016. V. 88. P. 045006.
7. Kichatov B., Korshunov A., Sudakov V., Kolobov A., Gubernov V., Golubkov A., Kiverin A. Kinetics of Cluster Formation in Active Suspension: Coarsening Regime // *J. Chem. Phys.* 2020. V. 153. P. 084902.
8. Trukhachev F.M., Gerasimenko N.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Elastic and Inelastic Particles Scattering by Dust Acoustic Soliton. A New Oscillatory Process in Dusty Plasma // *New J. Phys.* 2021. V. 23. P. 093016.
9. Васильев М.М., Алексеевская А.А., Косс К.Г., Васильева Е.В., Петров О.Ф. Самоорганизация кластеров активных броуновских частиц в коллоидной плазме при воздействии лазерного излучения // *ТВТ*. 2023. Т. 61. № 6. С. 825.
10. Bricard A., Caussin J.-B., Das D., Savoie C., Chikkadi V., Shitara K., Chepizhko O., Peruani F., Saintillan D., Bartolo D. Emergent Vortices in Populations of Colloidal Rollers // *Nat. Commun.* 2015. V. 6. P. 7470.
11. Von Grünberg H., Keim P., Maret G. Phase Transitions in Two-Dimensional Colloidal Systems // *Soft Matter*. 2007. V. 3. P. 41.
12. Melzer A., Krüger H., Schütt S., Mulsow M. Dust-density Waves in Radio-frequency Discharges under Magnetic Fields // *Phys. Plasmas*. 2020. V. 27. P. 033704.
13. Svetlov A.S., Trukhachev F.M., Kononov E.A., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Control of Wave Processes in Systems of Active Brownian Particles in Gas-Discharge Plasma // *Phys. Plasmas*. 2025. V. 32. P. 023702.
14. Дубинов А.Е., Кутаев И.Н. Пылевые потоки в нелинейных пыле-акустических волнах в плазме // *ТВТ*. 2023. Т. 61. № 1. С. 11.
15. Yu J., Jin D., Chan K.-F., Wang Q., Yuan K., Zhang L. Active Generation and Magnetic Actuation of Microrobotic Swarms in Bio-Fluids // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 5631.
16. Schmidt C.K., Medina-Sánchez M., Edmondson R.J., Schmidt O.G. Engineering Microrobots for Targeted Cancer Therapies from a Medical Perspective // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. P. 5618.
17. Boltnev R.E., Kononov E.A., Trukhachev F.M., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Synthesis of Nanoclusters and Quasy One-Dimensional Structures in Glow Discharge at $T \approx 2$ K // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29. P. 085004.
18. Boltnev R.E., Vasiliev M.M., Kononov E.A., Petrov O.F. Formation of Solid Helical Filaments at Temperatures of Superfluid Helium as Self-Organization Phenomena in Ultracold Dusty Plasma // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 3261.
19. Merlino R.L., D'Angelo N. Electron and Ion Inertia Effects on Current-Driven Collisional Dust Acoustic, Dust Ion Acoustic, and Ion Acoustic Instabilities // *Phys. Plasmas*. 2005. V. 12. P. 054504.
20. Shukla P.K., Mamun A.A. Introduction to Dusty Plasma Physics. Boca Raton: CRC Press, 2015. 284 p.
21. Trukhachev F.M., Petrov O.F., Vasiliev M.M., Tomov A.V. Relationship between the Dust-Acoustic Soliton Parameters and the Debye Radius // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1556. P. 012073.
22. Молотков В.И., Нефедов А.П., Торчинекий В.М., Фортвов В.Е., Храпак А.Г. Пылезвуковые волны в плазме тлеющего разряда постоянного тока // *ЖЭТФ*. 1999. Т. 16. № 3(9). С. 902.
23. Попель С.И., Морозова Т.И. Волновые процессы при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны // *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. № 5. С. 474.
24. D'Angelo N., Merlino R.L. Current-driven Dust-acoustic Instability in a Collisional Plasma // *Planet. Space Sci.* 1996. V. 44. P. 1593.
25. Popel S.I., Yu M.Y. Modulational Interaction of Short-wavelength Ion-acoustic Oscillations in Impurity-containing Plasmas // *Phys. Rev. E*. 1994. V. 50. № 4. P. 3060.
26. Lisin E.A., Vaulina O.S., Lisina I.I., Petrov O.F. Motion of a Self-Propelled Particle with Rotational Inertia // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2022. V. 24. P. 14150.

REFERENCES

1. Klumov B., Huber P., Vladimirov S., Thomas H., Ivlev A., Morfill G., Fortov V., Lipaev A., Molotkov V. Structural Properties of 3D Complex Plasmas: Experiments Versus Simulations // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2009. V. 51. P. 124028.
2. Karasev V.Y., Polischuk V.A., Dzlieva E.S., Pavlov S.I., Gorbenko A.P. About the Mechanism of Modification of Melamine Formaldehyde Particles in Dusty Plasmas // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1556. P. 012080.
3. Mitic S., Pustynnik M.Y., Morfill G.E. Spectroscopic Evaluation of the Effect of the Microparticles on Radiofrequency Argon Plasma // *New J. Phys.* 2009. V. 11. P. 083020.
4. Kononov E.A., Senoshenko R.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Active Brownian Motion of Emulsion Droplets Driven by Nanoscale Effects under Laser Irradiation // *Phys. Fluids*. 2024. V. 36 P. 117145.
5. Petrov O.F., Statsenko K.B., Vasiliev M.M. Active Brownian Motion of Strongly Coupled Charged Grains Driven by Laser Radiation in Plasma // *Sci. Rep.* 2022. V. 12. P. 8618.
6. Bechinger C., Di Leonardo R., Löwen H., Reichhardt C., Volpe G., Volpe G. Active Particles in Complex and Crowded Environments // *Rev. Mod. Phys.* 2016. V. 88. P. 045006.
7. Kichatov B., Korshunov A., Sudakov V., Kolobov A., Gubernov V., Golubkov A., Kiverin A. Kinetics of Cluster Formation in Active Suspension: Coarsening Regime // *J. Chem. Phys.* 2020. V. 153. P. 084902.
8. Trukhachev F.M., Gerasimenko N.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Elastic and Inelastic Particles Scattering by Dust Acoustic Soliton. A New Oscillatory Process in Dusty Plasma // *New J. Phys.* 2021. V. 23. P. 093016.
9. Vasiliev M.M., Alekseevskaya A.A., Koss K.G., Vasilyeva E.V., Petrov O.F. Self-organization of clusters of active Brownian particles in colloidal plasma under the influence of laser radiation // *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 61, 6, 825, 2023. (In Russ.)
10. Bricard A., Caussin J.-B., Das D., Savoie C., Chikkadi V., Shitara K., Chepizhko O., Peruani F., Saintillan D., Bartolo D. Emergent Vortices in Populations of Colloidal Rollers // *Nat. Commun.* 2015. V. 6. P. 7470.
11. Von Grünberg H., Keim P., Maret G. Phase Transitions in Two-Dimensional Colloidal Systems // *Soft Matter*. 2007. V. 3. P. 41.
12. Melzer A., Krüger H., Schütt S., Mulsow M. Dust-density Waves in Radio-frequency Discharges under Magnetic Fields // *Phys. Plasmas*. 2020. V. 27. P. 033704.
13. Svetlov A.S., Trukhachev F.M., Kononov E.A., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Control of Wave Processes in Systems of Active Brownian Particles in Gas-Discharge Plasma // *Phys. Plasmas*. 2025. V. 32. P. 023702.
14. Dubinov A.E., Kitaev I.N. Dust flows in nonlinear dust-acoustic waves in plasma // // *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 61, 1, 11, 2023. (In Russ.)
15. Yu J., Jin D., Chan K.-F., Wang Q., Yuan K., Zhang L. Active Generation and Magnetic Actuation of Microrobotic Swarms in Bio-Fluids // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 5631.
16. Schmidt C.K., Medina-Sánchez M., Edmondson R.J., Schmidt O.G. Engineering Microrobots for Targeted Cancer Therapies from a Medical Perspective // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. P. 5618.
17. Boltnev R.E., Kononov E.A., Trukhachev F.M., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Synthesis of Nanoclusters and Quasy One-Dimensional Structures in Glow Discharge at $T \approx 2$ K // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29. P. 085004.
18. Boltnev R.E., Vasiliev M.M., Kononov E.A., Petrov O.F. Formation of Solid Helical Filaments at Temperatures of Superfluid Helium as Self-Organization Phenomena in Ultracold Dusty Plasma // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 3261.
19. Merlini R.L., D'Angelo N. Electron and Ion Inertia Effects on Current-Driven Collisional Dust Acoustic, Dust Ion Acoustic, and Ion Acoustic Instabilities // *Phys. Plasmas*. 2005. V. 12. P. 054504.
20. Shukla P.K., Mamun A.A. Introduction to Dusty Plasma Physics. Boca Raton: CRC Press, 2015. 284 p.
21. Trukhachev F.M., Petrov O.F., Vasiliev M.M., Tomov A.V. Relationship between the Dust-Acoustic Soliton Parameters and the Debye Radius // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1556. P. 012073.
22. Molotkov V.I., Nefedov A.P., Torchinekiy V.M., Fortov V.Ye., Khrapak A.G. Pylezvukovye volny v plazme tleyushchego razryada postoyannogo toka // *JETP*, 16, 3(9), 902, 1999. (In Russ.)
23. Popel' S.I., Morozova T.I. Volnovyye protsessy pri vzaimodeystvii khvosta magnitosfery Zemli s pylevoy plazmoy u poverkhnosti Luny // *Fizika plazmy*, 43, 5, 474, 2017. (In Russ.)
24. D'Angelo N., Merlini R.L. Current-driven Dust-acoustic Instability in a Collisional Plasma // *Planet. Space Sci.* 1996. V. 44. P. 1593.
25. Popel' S.I., Yu M.Y. Modulational Interaction of Short-wavelength Ion-acoustic Oscillations in Impurity-containing Plasmas // *Phys. Rev. E*. 1994. V. 50. № 4. P. 3060.
26. Lisin E.A., Vaulina O.S., Lisina I.I., Petrov O.F. Motion of a Self-Propelled Particle with Rotational Inertia // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2022. V. 24. P. 14150.

Сведения об авторах

Сеносенко Рада Владимировна — младший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия, Российская Федерация, e-mail: senoshenko@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-3461-5986>

Трухачев Федор Михайлович — др. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия, Российская Федерация, e-mail: ftru@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9099-615X>

Кононов Евгений Александрович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия, Российская Федерация, e-mail: gadvin@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2340-6869>

Васильев Михаил Михайлович — др. физ.-мат. наук, профессор РАН, главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия, Российская Федерация, e-mail: vasiliev@ihed.ras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0425-1152>

Петров Олег Федорович — др. физ.-мат. наук, академик РАН, главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия, Российская Федерация, e-mail: ofpetrov@ihed.ras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6373-0305>

Author information

Senoshenko, Rada V. — junior researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: senoshenko@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-3461-5986>

Trukhachev, Fedor M. — Dr., leading researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: ftru@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9099-615X>

Kononov, Evgenii A. — Dr., senior researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: gadvin@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2340-6869>

Vasiliev, Mikhail M — Dr., RAS professor, chief researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: vasiliev@ihed.ras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0425-1152>

Petrov, Oleg F. — Dr., RAS academician, chief researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: ofpetrov@ihed.ras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6373-0305>

Поступила в редакцию 14.11.2025
После доработки 04.12.2025
Принята к публикации 15.12.2025

Received November 14, 2025
Revised December 4, 2025
Accepted December 15, 2025