

ДВОЙНЫЕ ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В РАЗЛИЧНЫХ ФАЗАХ СТРАТЫ В УМЕРЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2023 г. С. И. Павлов^{a,*}, Е. С. Дзलिएва^{a,**}, Л. Г. Дьячков^b, Л. А. Новиков^a,
М. В. Балабас^a, В. Ю. Карасев^a

^a Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^b Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*e-mail: s.i.pavlov@spbu.ru

**e-mail: plasmadust@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 17.06.2023 г.

Принята к публикации 29.06.2023 г.

Исследуются объемные плазменно-пылевые образования, в составе которых находились калиброванные пылевые частицы, различные по размеру и плотности материала. Изучались особенности формирования структур в стратифицированном тлеющем разряде, а также их форма и динамика во внешнем магнитном поле. Из нескольких видов порошков получены разделенные в пространстве двойные структуры, которые заполняют пылевую ловушку, находясь в разных фазах страты. Получены зависимости средней угловой скорости вращения для каждой части структуры в магнитном поле. В диапазоне, где механизм вращения зависит от размера частиц и доминирует сила ионного увлечения, проведены численные оценки скорости вращения с учетом изменения параметров вдоль страты.

Ключевые слова: пылевая плазма, магнитное поле, тлеющий разряд, стоячие страты, пылевые структуры

DOI: 10.31857/S036729212360053X, **EDN:** EQWDEV

1. ВВЕДЕНИЕ

При экспериментальном исследовании комплексной плазмы применяются методы динамичного воздействия с наблюдением и анализом отклика пылевой подсистемы [1–4]. Используются столкновительные эксперименты с отдельными частицами [5], столкновения и взаимные проникновения бинарных пылевых смесей [6, 7], воздействия на фоновую плазму, например, гармонические [8, 9] и ультракороткие с одиночными либо ударными волнами [10, 11]. Особый интерес представляют используемые сегодня инвазивные или избирательные воздействия. К первым можно отнести лазерное облучение [12, 13], а также термофорез [14, 15]. Среди вторых продуктивным оказалось применение магнитного поля различных диапазонов, эффективно воздействующих на разные компоненты плазмы: электроны, ионы и пылевые гранулы. Как правило, воздействие на пылевые гранулы происходит опосредованно, через более легкие компоненты или изменение свойств разряда [16, 17].

Действие магнитного поля на пылевую плазму наиболее сложно и более эффективно в случае трехмерной пылевой системы, формируемой в

объемных пылевых ловушках [18]. В первых работах, где создавались протяженные пылевые структуры, использовались электроды специальной конструкции [19–21]. Далее применялись ограничивающие потоки вставки в электроды [22, 23]. В условиях тлеющего разряда применение подобных вставок [24–26] приводит к стимулированию механизмов вращения, раскручивающих пылевую плазму до больших скоростей. Использование естественной газоразрядной ловушки, – стоячей страты в магнитном поле, оказалось очень продуктивным как для изучения динамики пылевой компоненты [27–31], так и для изучения свойств газового разряда в магнитном поле [32–35].

Стоячая и бегущая страты являются волнами ионизации [36–38]. Вдоль страты параметры плазмы распределены неравномерно. В стратах большой амплитуды [39] максимумы электрического поля и концентрации ионов разнесены примерно на четверть длины страты. На устойчивой анодной ветви электрического поля в страте формируется пылевая ловушка, различная по положению для разных размеров пылевых частиц [8, 40]. Сегодня представления о кинетике элект-

тронов и стратификации разряда широко развиваются, не в последнюю очередь в связи с приложением к пылевой плазме [41–43]. Экспериментальные исследования с сильно заполненной пылевыми частицами стратой: большие пылевые структуры из полидисперсных частиц [44]; разделенные при наклоне трубки [45, 46], в однородном и неоднородном магнитном поле [47, 48] представляют собой богатый полигон для изучения динамики пылевой плазмы и свойств тлеющего разряда. В настоящей работе ставится задача изучения свойств пылевой ловушки и динамики пылевой плазмы в магнитном поле в разных фазах страты, при одновременном применении частиц разных размеров левитирующих в различных фазах страты.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент проводился на установке, применяемой для исследования вращения плазменно-пылевых структур в стратах в магнитном поле, описанной в [27]. Она состояла из газоразрядной трубки и создающей магнитное поле системы из двух катушек с зазором между ними 9 см. Разрядная трубка могла перемещаться вдоль своей оси для того, чтобы изменить положение стоячей страты в магнитном поле. Страта с исследуемой пылевой структурой помещалась в середину зазора между двумя катушками для исключения влияния неоднородности магнитного поля. Магнитное поле изменялось в диапазоне от 0 до 500 Гс. Для боковой подсветки пылевых структур и контроля положения стоячей страты использовался зазор между магнитными катушками. Подсветка производилась лазерным “ножом”, который формировался с помощью полупроводникового лазера KLM-M650-40-5 с длиной волны 650 нм и мощностью 40 мВт, микрообъектива и цилиндрической линзы. Наблюдение за вращением пылевых структур подсвеченных горизонтальным лазерным ножом производилось сверху через торцевое оптическое окно газоразрядной трубки с фиксацией верхней камерой. Вертикальные сечения структур наблюдались сбоку и фиксировались боковой камерой. Все наблюдения проводились в первой стоячей страте в сторону анода от сужающей разряд диэлектрической вставки. Длина разрядной трубки была 80 см, радиус 1.5 см. Трубка была снабжена никелевыми электродами, ее центральная часть длиной 40 см находилась в магнитном поле, электроды были вынесены вне магнитного поля.

Пылевая плазма создавалась в неоне при давлении 0.37 Торр и токе разряда 1.5 мА. Для создания двойной пылевой структуры использовались монодисперсные сферические микрочастицы диаметрами 8.2 мкм и 5.19 мкм, изготовленные из

меламин-формальдегида (MF) плотностью 1.5 г/см³, и частицы диаметром 1.0 мкм, изготовленные из диоксида кремния плотностью 2.2 г/см³. Такие размеры частиц были выбраны для получения отдельных пылевых структур, исходя из различия параметров плазмы вдоль страты, а также из-за проблемы слипания мелких частиц меламин-формальдегида [49, 50]. В различных экспериментах структуры создавались из двух типов частиц: 8.2 и 5.19 мкм, либо 5.19 и 1 мкм. Так как для пары микрочастиц 8.2 и 5.19 мкм удалось создать наиболее разделенные по вертикали пылевые структуры, то далее основные результаты будут приведены с этой парой размеров частиц.

Для отдельного инжектирования в разряд пылевых частиц разных размеров в одном эксперименте использовались два контейнера. Сначала путем аккуратного встряхивания первого контейнера формировалась нижняя структура из пылинок 8.2 мкм таким образом, чтобы в горизонтальном сечении было как минимум две замкнутые оболочки (вращение кластера, с таким количеством частиц в горизонтальном сечении более устойчиво) [51]. Далее вбрасывались частицы из второго контейнера, и верхняя структура формировалась над первой. Вертикальное сечение двух разделенных пылевых структур в одной стоячей страте показано на рис. 1а. На рис. 1б и в представлены горизонтальные сечения обеих пылевых структур.

В эксперименте после фотографирования вертикальных сечений и видеозаписи горизонтальных сечений структур, магнитное поле изменялось, и далее записывались новые изображения. На рис. 2 представлено вертикальное сечение двойной пылевой структуры в магнитном поле 135 Гс. Для каждой из структур по видеозаписям определялась средняя угловая скорость вращения сечений по стандартной процедуре [27, 44]. Погрешность измерения угловой скорости в основном связана с погрешностью позиционирования центра вращения сечений.

По полученным изображениям были определены геометрические характеристики сечений и межчастичное расстояние в каждой структуре, а также угловая скорость вращения в зависимости от магнитного поля. На рис. 3 представлена зависимость проекции угловой скорости вращения пылевых структур на вектор магнитной индукции \mathbf{B} . В диапазоне значений B , где проекция угловой скорости отрицательна, зависимости для обеих структур ведут себя одинаковым образом. После поля остановки (B_0) верхняя структура вращалась с положительной скоростью, а вращение нижней не развивалось. Заметим, что структуры из калиброванных частиц не имели радиального и осевого градиентов вращения.

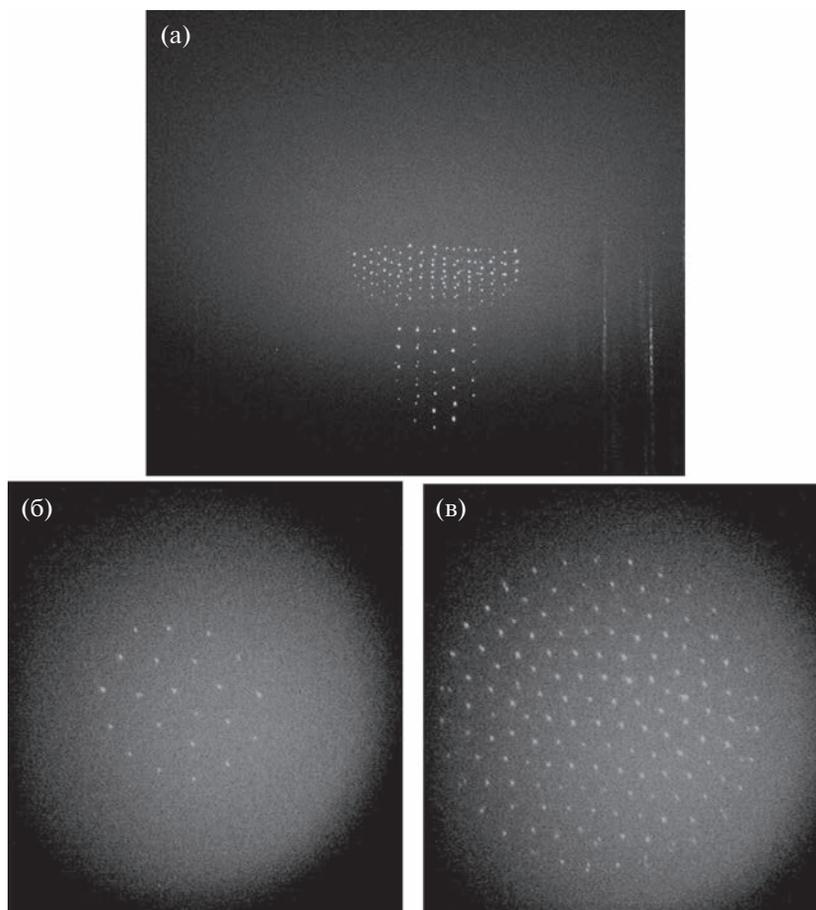


Рис. 1. а) Фотография вертикального сечения двойной пылевой структуры: нижняя (первая) структура сформирована из частиц MF размером 8.2 мкм, верхняя (вторая) структура сформирована из частиц MF размером 5.19 мкм, ширина изображения 14.25 мм, б) горизонтальное сечение нижней структуры из частиц размером 8.2 мкм, ширина изображения 5.7 мм, в) горизонтальное сечение верхней структуры из частиц размером 5.19 мкм, ширина изображения 5.4 мм. Условия: разряд в неоне, $P = 0.37$ Торр, $I = 1.5$ мА, $B = 0$.

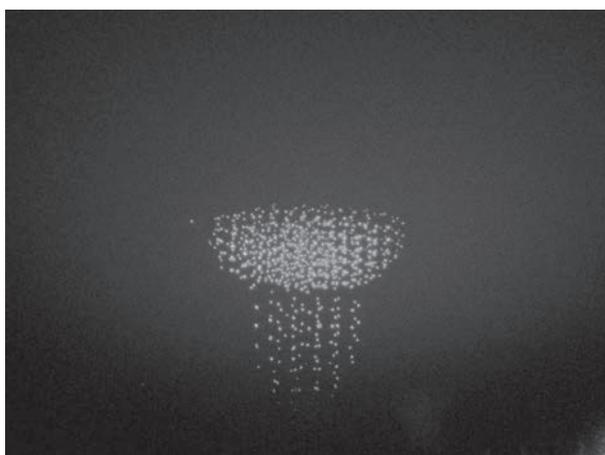


Рис. 2. Фотография вертикального сечения двойной пылевой структуры: нижняя структура сформирована из частиц MF размером 8.2 мкм, верхняя структура сформирована из частиц MF размером 5.19 мкм. Условия: Ne, $P = 0.37$ Торр, $I = 1.5$ мА, $B = 135$ Гс. Ширина изображения 13.5 мм.

На рис. 4 показано изменение вертикального зазора между структурами (расстояния от верхней частицы в нижней структуре до нижней частицы в верхней структуре) как функции магнитного поля B . С ростом магнитного поля до величины 75 Гс это расстояние уменьшалось, при дальнейшем увеличении магнитного поля до 200 Гс величина зазора была постоянна. В диапазоне от 200 до 270 Гс наблюдалось некоторое уменьшение зазора, а при $B > 270$ Гс нижняя структура деградировала. В итоге в эксперименте в диапазоне магнитного поля до 270 Гс были получены две отдельные плазменно-пылевые структуры. Рисунок 2 показывает геометрию обеих структур до деградации нижней структуры.

Рисунки 5 и 6 демонстрируют зависимости вертикальных и горизонтальных межчастичных расстояний в обеих структурах с изменением магнитного поля. До величины B порядка 135 Гс межчастичные расстояния оставались неизмен-

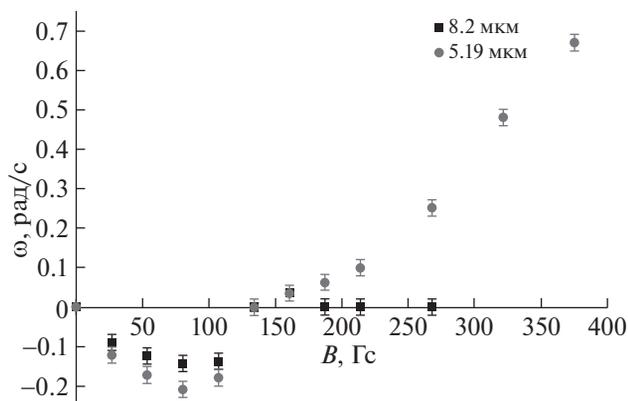


Рис. 3. Зависимость угловой скорости пылевых структур от магнитной индукции B . Условия: Ne , $P = 0.37$ Торр, $I = 1.5$ мА. ■ — нижняя пылевая структура (частицы 8.2 мкм), ● — верхняя структура (5.19 мкм).

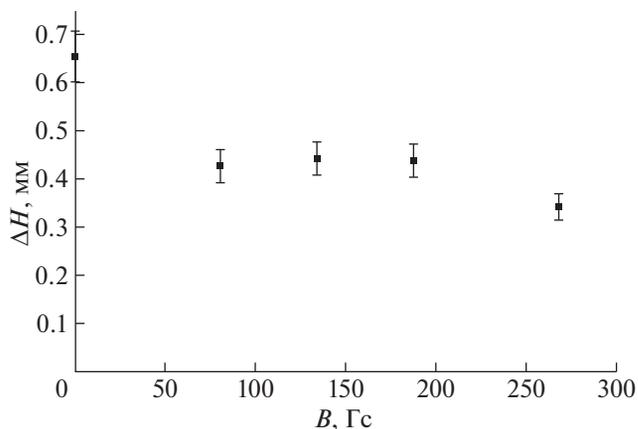


Рис. 4. Зависимость вертикального зазора между пылевыми структурами от магнитной индукции B . Условия: Ne , $P = 0.37$ Торр, $I = 1.5$ мА.

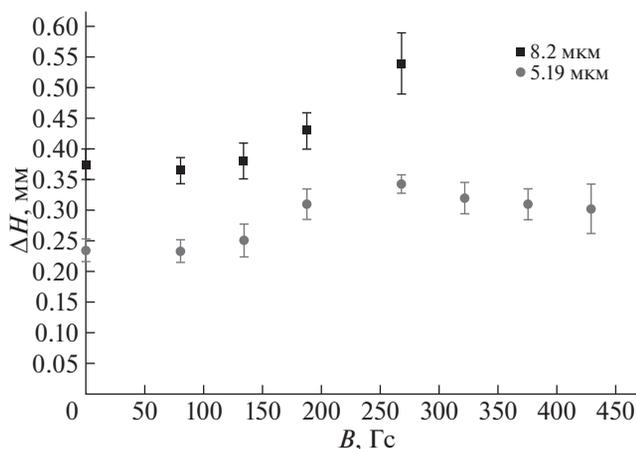


Рис. 5. Зависимость вертикального межчастичного расстояния в пылевых структурах от магнитной индукции B . Условия: Ne , $P = 0.37$ Торр, $I = 1.5$ мА. ■ — нижняя пылевая структура (8.2 мкм), ● — верхняя структура (5.19 мкм).

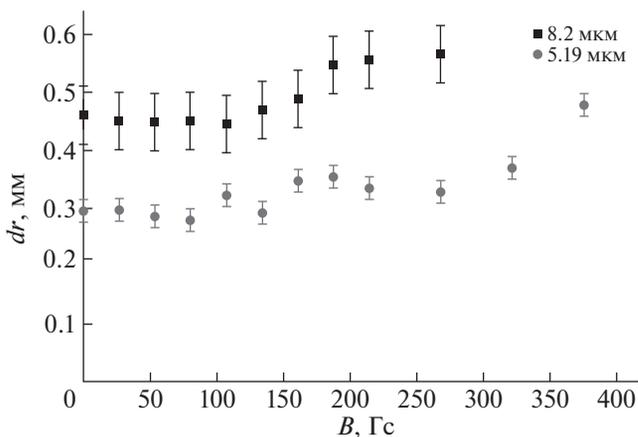


Рис. 6. Зависимость горизонтального (радиального) межчастичного расстояния в пылевых структурах от магнитной индукции B . Условия: Ne , $P = 0.37$ Торр, $I = 1.5$ мА. ■ — нижняя пылевая структура (8.2 мкм), ● — верхняя структура (5.19 мкм).

ными. В итоге, в диапазоне магнитного поля до 135 Гс структуры оставались однородными.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из характеристик пылевых образований, полученных из калиброванных частиц разного размера в одной стоячей страте, обсудим особенности их геометрии и динамики в магнитном поле. Для уединенной пылевой частицы с учетом ее положения в страте свяжем параметры плазмы с измеренной скоростью вращения. При вращательном движении пылевых структур в магнитном поле в страте могут работать два механизма вращения [18, 29–31, 52]: ионное увлечение и увлечение вращающимся газом из-за вихревого

тока. Поскольку только первый механизм чувствителен к размеру частиц и их заряду, для численных оценок ограничимся диапазоном магнитного поля до наступления инверсии вращения $B < B_0$, когда проекция угловой скорости на вектор магнитной индукции отрицательна.

Первоначально в отсутствии магнитного поля были определены размеры пылевых структур и их положения в страте. При использовании пары частиц 8.2 и 5.19 мкм нижняя структура (из 8.2 мкм частиц) формировалась над нижней границей свечения страты со стороны катода, вторая структура формировалась над первой. Разделение структур в пространстве четко соблюдалось, рис. 4.

Магнитное поле вызывало вращательное движение обеих структур, как это наблюдалось ранее с одной структурой [27, 28, 44]. Если проводить сравнение с орбитальным движением частиц под действием фотофоретических сил [53, 54], то в наших исследованиях использовался маломощный лазер (40 мВт), что сопоставимо с условиями в работе [53], при котором необработанные частицы приходят в движение при облучении их лазерным излучением. В нашем исследовании орбитальное движение вызвано действием силы ионного увлечения. Созданные пылевые структуры, в отличие от экспериментов [27, 44] с применением полидисперсных частиц, были не протяженными по вертикали, осевой градиент угловой скорости у них отсутствовал. Однородность вращения и постоянство межчастичного расстояния в каждой пылевой структуре (рис. 5 и рис. 6) показали, что каждое созданное образование достаточно однородно. На рис. 3 представлена зависимость угловой скорости вращения от магнитного поля для обеих структур. В диапазоне отрицательной проекции скорости на вектор магнитной индукции нижняя структура вращается медленнее, рис. 3. В рассматриваемом диапазоне поля $B < B_0 = 150$ Гс доминирующим механизмом вращения служит сила ионного увлечения. Она пропорциональна квадрату размера частицы, но частицы большего размера, левитирующие в нижней структуре, вращаются медленнее. Это объясняется разными значениями параметров плазмы в разных фазах страты.

На рис. 7 схематически показано распределение основных плазменных параметров вдоль страты: напряженности поля, плотности плазмы, температуры (средней энергии) электронов и свечения страты. В пылевой ловушке на конкретной высоте h сила ионного увлечения должна определяться параметрами плазмы в соответствии с фазой страты. В силу однородности каждой структуры можно выбрать высоту середины структуры и рассматривать действие силы ионного увлечения на пробную пылевую частицу соответствующего размера на выбранной высоте, т.е., с локальными параметрами n_i , E_r , T_e и др. Скорость вращения частицы при $B < B_0$ определяется балансом силы ионного увлечения [1–4] и силы торможения. Сила ионного увлечения [3]

$$F_{id} = \frac{8\sqrt{2\pi}}{3} a^2 n_i m_i v_{Ti} u \left\{ 1 + \frac{1}{2} z \tau + \frac{z^2 \tau^2}{4} \Pi \right\}, \quad (1)$$

где n_i , m_i , v_{Ti} – концентрация, масса и тепловая скорость ионов, $\Pi \approx 1$ – модифицированный кулоновский логарифм, $\tau = T_e/T_i$ – отношение электронной температуры к ионной, $z = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Z_d|e^2}{akT_e}$, eZ_d – заряд пылевой частицы, $u =$

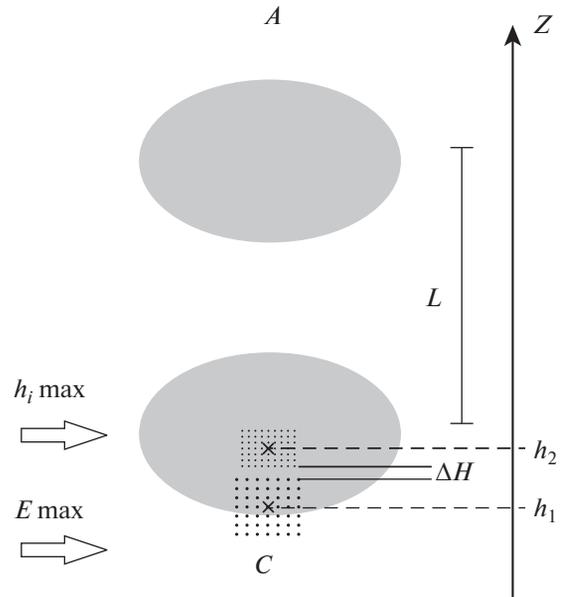


Рис. 7. Схематическое расположение двойной пылевой структуры в пылевой ловушке в страте. Обозначения: L – длина страты, A – анод, C – катод.

$= \omega_i \tau_i b_i E_r$ – азимутальная скорость иона в магнитном поле, ω_i – ионная циклотронная частота, τ_i – время между столкновениями ионов с атомами газа, b_i – подвижность иона, E_r – радиальное электрическое поле, a – радиус пылевой частицы. В случае разреженного газа сила торможения – это сила Эпштейна [1–4]

$$F_{Ep} = \frac{8\sqrt{2\pi}}{3} \gamma a^2 n_n k T_n \frac{U_d}{v_T}, \quad (2)$$

где n_n , T_n , v_T – концентрация, температура и тепловая скорость нейтралов, γ – коэффициент порядка единицы, определяемый особенностями взаимодействия нейтралов с поверхностью частицы, U_d – скорость пылевой частицы. Приравняв силы для вращающейся частицы на радиусе r_d и полагая, что заряд частицы $q = Z_d e = C U_{fl} \sim a T_e$, тут C – емкость, U_{fl} – плавающий потенциал, для угловой скорости пылевой частицы получаем выражение с точностью до числового коэффициента

$$\omega \approx \frac{n_i}{n_n} \frac{(b_i E_r)}{r_d} (\omega_i \tau_i) \left(\frac{T_e}{T_i} \right)^2. \quad (3)$$

Измерения скорости вращения в магнитном поле в эксперименте были проведены сразу для частиц двух размеров, при этом значения магнитного поля, тока разряда, давления газа и возможное загрязнение газом материалом частиц [55] были одинаковы. Точность сравнения действия механизма вращения в двух пылевых структурах

будет более высокой, если рассмотреть непосредственно отношение скоростей вращения

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \left(\frac{n_{i2}}{n_{i1}}\right) \left(\frac{E_{r2}}{E_{r1}}\right) \frac{T_{e2}}{T_{e1}}. \quad (4)$$

В этом случае в разных фазах страты (на разных высотах h) нужно задать только: n_i , E_r , T_e . При $V = B_0$ сила ионного увлечения уравнивается увлечением вращающимся газом из-за вихревого тока в головной части страты, где левитируют пылевые частицы. Для определенности выберем значение магнитного поля около 75 Гс вблизи $V = B_0/2$, при котором полученное экспериментально соотношение $\omega_2/\omega_1 = 1.5$, рис. 3. Для получения оценок по (4) существует определенная проблема с выбором значений n_i , E_r , T_e в разных фазах страты, обсудим ее отдельно.

Согласно литературным данным по бегущим и стоячим стратам [36–38, 56], максимум продольного поля и температуры электронов сдвинут в сторону катода относительно максимума плотности и свечения на величину от четверти до половины длины страты. Согласно зондовым измерениям [57], максимум радиального поля совпадает с максимумом продольного и максимумом средней энергии (температуры) электронов. Определение в нашем эксперименте распределения яркости свечения вдоль страты и положений центров пылевых структур позволили нам моделировать распределения нужных параметров вдоль по фазе страты. Величины электрического поля на длине страты отличаются в несколько раз, а значения плотности электронов почти на порядок. Теоретические и экспериментальные данные о n_i , E_r , T_e содержатся в работах [8, 58–61], в том числе, для условий нашего эксперимента.

Заметим, что существуют две особенности в выборе данных параметров, связанные с кинетикой электронов и влиянием магнитного поля. Во-первых, в разряде низкого давления и слабого тока в инертных газах кинетика электронов имеет нелокальный характер, функция распределения электронов по энергиям не является максвелловской. В [8] показано, что при условиях близких к нашим, сдвиги фазы между полем и плотностью электронов различны для максвелловского и реального распределений электронов. Во-вторых, при наложении магнитного поля, замагничивающего электроны, в неоне при $p = 0.4$ Торр это 100 Гс, происходит переход от нелокального режима кинетики к локальному [56]. По данным [62] в неоне такой переход будет происходить в магнитном поле до 300 Гс. Обнаруженная немонотонная зависимость напряженности электрического поля E от магнитного поля была объяснена в [56] изменением функции распределения электронов в области больших энергий (максвеллизацией электронов). В итоге, анализируя лите-

ратурные данные, для численной оценки в условиях нашего эксперимента с 5.19 мкм и 8.2 мкм частицами мы приняли, что отношения параметров плазмы могут быть следующими: $n_{i2}/n_{i1} = 4$, $E_{r2}/E_{r1} = 0.6$, $T_{e2}/T_{e1} = 0.6$. При них оценка по (4) дает значение 1.4, для выбранного диапазона магнитного поля это хорошее согласие. Как говорилось выше, в магнитном поле существует вращение и из-за вихревого тока, но в поле, меньшем чем B_0 , при малом до 3 мм разнесении двух структур действие второго механизма не проявляется.

Смена механизма вращения пылевой структуры при $V = B_0$ (на графике на рис. 3 это 150 Гс) связана с усилением действия вихревого тока. Магнитные поля, при которых электроны замагничиваются, начинают влиять на характеристики разряда, и мы обнаруживаем деградацию нижней части пылевой структуры. Выпуклый книзу профиль страты меняется на вогнутый, структура перестает вращаться, и при увеличении магнитного поля нижние частицы выпадают из ловушки в страте. На рис. 3 скорость вращения нижней структуры в поле свыше 150 Гс равна нулю. При этом верхняя структура развивает вращение с положительной проекцией угловой скорости. Заметим, что полученные результаты согласуются с результатами для объемной пылевой структуры [27, 44] из полидисперсных частиц и для структуры из калиброванных частиц [28, 29], приобретающей кольцевую форму и далее деградирующей в магнитном поле 700 Гс.

Поскольку магнитное поле воздействует на пылевую ловушку в головной (в эксперименте в нижней) части страты, то возникает интерес к применению более легких (мелких) пылевых частиц, способных левитировать в наиболее верхней фазе страты. Как говорилось выше, в эксперименте также использовалась другая пара частиц с размерами 5.19 мкм и 1 мкм. Но с данными частицами нам не удалось получить две отдельные структуры. Верхнее пылевое образование, состоящее из одномикронных частиц, сливалось с нижним. При наблюдении сверху и сбоку можно было различать части структуры с большим и меньшим межчастичным расстоянием. Вращение верхней части структуры (1 мкм частицы) возникало только при дополнительном увеличении тока разряда (увеличение n_i и, соответственно, F_{id}). Данные наблюдения согласуются с экспериментами по зондированию разных фаз страты частицами в 1 мкм и 4 мкм в магнитном поле [32, 63]. В [63] у частиц 1 мкм в отличие от частиц 4 мкм в обсуждаемой фазе страты вращение, связанное с ионным увлечением не развивалось; падающие одномикронные частицы имели значительную азимутальную скорость лишь при малых h (ближе к катоду). По-видимому, в настоящем эксперименте отсутствие вращения у самых

мелких частиц связано как с их малым размером, так и с соответствующими значениями параметров плазмы в данной фазе страты.

Исходя из выполненных оценок и сопоставления с литературными данными, можно сказать, что изменение характеристик вращения пылевых структур в различных фазах страты объясняется следующими причинами. Поскольку в силу ионного увлечения входит произведение параметров n_i и E_r , то наибольшей величины сила увлечения достигает в области фазы страты между максимумами поля и концентрации. В условиях эксперимента в этой фазе левитировали частицы размером 5.19 мкм. Более крупные и более мелкие частицы, располагающиеся ближе к максимумам поля и концентрации, испытывают меньшее по величине действие силы ионного увлечения. Детальные наблюдения показали, что наиболее устойчивая в магнитном поле пылевая структура формируется в средней фазе страты. Это согласуется с экспериментами в сильном магнитном поле до 2 Тл [25, 26, 30, 31], где устойчивыми оказались структуры из частиц порядка 4 мкм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены эксперименты с пылевыми частицами размерами 1 мкм, 5.19 мкм и 8.2 мкм, формирующими пылевые структуры в различных фазах страты. Для различных пар размеров частиц созданы двойные структуры, изучены их динамика и расположение частиц в магнитном поле. Установлено, что в диапазоне магнитного поля, в котором доминирует сила ионного увлечения, эффективное вращение получает средняя пылевая структура, что связано как с различным размером частиц, так и с параметрами плазмы в этой фазе страты. Данная пылевая структура является наиболее устойчивой при наложении магнитного поля.

Экспериментальная часть работы выполнена при поддержке РФФИ, грант № 22-72-10004; теоретическая часть выполнена по госзаданию Министерства науки и высшего образования РФ № 075-01129-23-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fortov V.E., Morfill G.E. Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. New York: Taylor and Francis, 2010.
2. Цытович В.Н., Морфилл Г.Е., Томас В.Х. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. С. 675.
3. Фортвов В.Е., Петров О.Ф., Молотков В.И. и др. // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495.
4. Bonitz M., Horing N., Ludwig P. Introduction to Complex Plasma. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
5. Konopka U., Ratke L., Thomas H.M. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 1269.
6. Thomas E. // New J. Phys. 2003. V. 5. P. 45.1.
7. Sütterlin K.R., Wysocki A., Ivlev A.V., Rätz C., Thomas H.M., Rubin-Zuzic M., Goedheer W.J., Fortov V.E., Lipaev A.M., Molotkov V.I., Petrov O.F., Morfill G.E., Löwen H. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. P. 085003.
8. Golubovskii Yu., Karasev V., Kartasheva A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. V. 26. P. 115003.
9. Holman A., Melzer A., Piel A. // Phys. Rev. E. 1999. V. 59. P. 3835.
10. Fortov V.E., Petrov O.F., Molotkov V.I., Poustylnik M.Y., Torchinsky V.M., Naumkin V.N. Khrapak A.G. // Phys. Rev. E. 2005. V. 71. P. 036413.
11. Samsonov D., Zhdanov S.K., Quinn R.A., Popel S.I., Morfill G.E. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 255004.
12. Ворона Н.А., Гавриков А.В., Иванов А.С., Петров О.Ф., Фортвов В.Е., Шахова И.А. // ЖЭТФ. 2007. Т. 132. № 4. С. 941.
13. Vasiliev M.M., Petrov O.F., Alekseevskaya A.A., Ivanov S.I., Vasilieva E.V. // Molecules. 2020. V. 25. P. 3375.
14. Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н., Фортвов В.Е. // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. № 5. С. 1166.
15. Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И., Дзлиева Е.С. // Опт. и Спектр. 2006. Т. 100. № 3. С. 499.
16. Chen F.F. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. New York: Plenum, 1987.
17. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971.
18. Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И. Лабораторная пылевая плазма в магнитном поле. СПб.: Свое Издательство, 2016.
19. Sato N., Uchida G., Kaneko T., Shimizu S., Iizuka S. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. № 5. P. 1786.
20. Kaw P.K., Nishikawa K., Sato N. // Phys. Plasmas. 2002. V. 9. P. 387.
21. Ishihara O., Kamimura T., Hirose K.I., Sato N. // Phys. Rev. E. 2002. V. 66. P. 046406.
22. Choudhary M., Bergert R., Moritz S., Mitic S., Thoma M.H. // Contrib. Plasma Phys. 2020. V. 61. e202000110.
23. Carstensen J., Greiner F., Hou L.J., Maurer H., Piel A. // Phys. Plasmas. 2009. V. 16. P. 013702.
24. Dzlieva E.S., D'yachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28. P. 085020.
25. Дзлиева Е.С., Дьячков Л.Г., Новиков Л.А., Карасев В.Ю., Павлов С.И. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 1. С. 7.
26. Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Дьячков Л.Г., Новиков Л.А., Павлов С.И. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 2. С. 186.
27. Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ivanov A.Yu., Eikhvald A.I. // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. P. 066403.
28. Васильев М.М., Дьячков Л.Г., Антипов С.Н., Петров О.Ф., Фортвов В.Е. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 6. С. 414.
29. Vasiliev M.M., Dyachkov L.G., Antipov S.N., Huijink R., Petrov O.F., Fortov V.E. // European Phys. Lett. 2011. V. 93. P. 15001.

30. *Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu.* // *European Phys. Lett.* 2018. V. 123. P. 15001.
31. *Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29. P. 085020.
32. *Dzlieva E.S., Karasev V.Yu., Pavlov S.I.* // *European Phys. Lett.* 2015. V. 110. P. 55002.
33. *Dzlieva E.S., Karasev V.Yu., Pavlov S.I., Ermolenko M.A., Novikov L.A., Maiorov S.A.* // *Contrib. Plasma Phys.* 2016. V. 56. P. 197.
34. *Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Golubev M.S., Ivanov A.Yu.* // *Contr. Plasma Phys.* 2011. V. 51. P. 509.
35. *Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И., Дзлиева Е.С.* // *Опт. и Спектр.* 2006. Т. 101. № 3. С. 511.
36. *Голубовский Ю.Б., Кудрявцев А.А., Некучаев В.О., Порохова И.А., Цендин Л.Д.* Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2004.
37. *Недоспасов А.В.* // *УФН.* 1968. Т. 94. № 3. С. 439.
38. *Ланда П.С., Мускинова Н.А., Пономарев Ю.В.* // *УФН.* 1980. Т. 132. № 4. С. 601.
39. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
40. *Луцаев А.М., Молотков В.И., Нефедов А.П. и др.* // *ЖЭТФ.* 1997. Т. 112. Вып. 6. С. 2030.
41. *Golubovskii Yu., Karasev V., Kartasheva A.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2018. V. 27. P. 065006.
42. *Сухинин Г.И., Федосеев А.В.* // *Физика плазмы.* 2007. V. 33. P. 1117.
43. *Zobnin A.V., Usachev A.D., Petrov O.F., Fortov V.E., Thoma M.H., Fink M.A.* // *Phys. Plasmas.* 2018. V. 25. P. 033702.
44. *Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И.* // *Опт. и Спектр.* 2005. Т. 98. С. 621.
45. *Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И.* // *Опт. и Спектр.* 2004. Т. 97. № 1. С. 107.
46. *Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И., Дзлиева Е.С.* // *Вестник СПбГУ. Сер. 4.* 2009. Вып. 1. С. 140.
47. *Абдирахманов А.Р., Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И., Новиков Л.А., Досболаев М.К., Коданова С.К., Рамазанов Т.С.* // *TBT.* 2021. Т. 59. С. 657.
48. *Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu.* // *Molecules.* 2021. V. 26. P. 3788.
49. *Chaudhuri M., Nosenko V., Knappek C., Konopka U., Ivlev A.V., Thomas H.M., Morfill G.E.* // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 100. P. 264101.
50. *Zobnin A.V., Usachev A.D., Fortov V.E.* // *AIPConf. Proc.* 2002 V. 649. P. 293.
51. *Pavlov S.I., Dzlieva E.S., Novikov L.A., Karasev V.Yu.* // X International conference on Plasma Physics and Plasma Technology. *Contrib. papers.* Minsk. 2022. P. 142.
52. *Nedospasov A.V.* // *Phys. Rev. E.* 2009. V. 79. P. 036401.
53. *Arkar K., Vasiliev M.M., Petrov O.F., Kononov E.A., Trukhachev F.M.* // *Molecules.* 2021. V. 26. P. 561.
54. *Svetlov A.S., Vasiliev M.M., Kononov E.A., Petrov O.F., Trukhachev F.M.* // *Molecules.* 2023. V. 28. P. 1790.
55. *Карасев В.Ю., Полищук В.А., Горбенко А.П., Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Макара М.М.* // *ФТТ.* 2016. Т. 58. Вып. 5. С. 1007.
56. *Цендин Л.Д.* // *УФН.* 2010. Т. 180. С. 139.
57. *Голубовский Ю.Б., Нусимов С.У., Сулейменов Э.И.* // *ЖТФ.* 1994. Т. 64. С. 54.
58. *Stewart A.B.* // *J. Appl. Phys.* 1956. V. 27. P. 911.
59. *Golubovskii Yu.B., Skoblo A.Yu., Wilke C., Kozakov R.V., Behnke J., Nekutchayev V.O.* // *Phys. Rev. E.* 2005. V. 72. P. 026414.
60. *Golubovskii Yu.B., Kozakov R.V., Maiorov V.A., Behnke J., Behnke J.F.* // *Phys. Rev. E.* 2000. V. 62. P. 2707.
61. *Golubovskii Yu.B., Kozakov R.V., Nekutchayev V.O., Skoblo A.Yu.* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41. P. 105205.
62. *Deutchsh N., Pfau S.* // *Beitr. Plasmaphys.* 1975. V. 6. № 1. P. 23.
63. *Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Машек И.Ч., Павлов С.И.* // *ЖТФ.* 2016. Т. 86. В. 6. С. 145.