

УДК 537.525.1

## ДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В РАЗНЫХ ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

С. И. Павлов<sup>а,\*</sup>, Е. С. Дзлиева<sup>а</sup>, Л. Г. Дьячков<sup>б</sup>, М. С. Голубев<sup>а</sup>,  
М. Б. Морозова<sup>а</sup>, Л. А. Новиков<sup>а</sup>, В. Ю. Карасев<sup>а,\*\*</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

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

\*\*e-mail: plasmadust@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.04.2024 г.

После доработки 25.05.2024 г.

Принята к публикации 30.05.2024 г.

Исследовано воздействие потоков плазменных частиц на объемную пылевую структуру в страте тлеющего разряда в двух инертных газах (в неоне и аргоне) в слабом магнитном поле. Определены параметры разрядов для создания трехмерных пылевых структур из пылевых частиц одного размера в обоих газах в магнитном поле. Получены зависимости угловых скоростей вращения пылевых структур в двух газах от индукции магнитного поля, а также зависимости от давления газа. По скоростям вращения пылинок в магнитном поле сопоставлены ионные потоки, воздействующие на пылевые образования.

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

**DOI:** 10.31857/S0367292124080079, **EDN:** OAWVHJ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Трехмерные пылевые структуры формируются в плазменно-пылевых ловушках с сильной неоднородностью плазмы. Динамика и равновесие пылевой частицы определяется балансом действующих на нее сил, которые имеют и электрическую природу, и диссипативную составляющую, как например сила ионного увлечения и сила термофореза [1–3]. Для этих сил очень важны величины плазменных потоков, вызывающих их электрических полей и градиентов концентрации и температуры. Управление плазменными потоками оказалось весьма эффективным в разряде постоянного тока в плазменно-пылевой ловушке в стоячей страте. Действие плазменных потоков может быть диагностировано по состоянию пробной пылевой частицы, которая является при данной диагностике «пылевым зондом» [4–7].

В последние несколько лет в экспериментах с пылевыми частицами применялись разные спо-

собы управления потоками, прежде всего ионными. Например, ионный поток существенно изменяется в плазме смесей газов с сильно различающимися потенциалами ионизации, как оценено в расчетах [8–10]. В [11–12] показано, что добавка ксенона (Xe) к гелию (He) до 5 % создает изменение в балансе сил – сила ионного увлечения превосходит вес частицы.

Наложение магнитного поля создает анизотропию потоков плазмы, которая различна для ионов и электронов в силу разной массы (замагниченности) [13]. Интересным оказалось одновременное использование пылевых частиц разного размера, формирующих двойные пылевые структуры в одной ловушке, в том числе из-за отличающихся потоков [14]. Наглядным оказалось то, что максимум скорости вращения в магнитном поле приходится на фазу страты с максимальной концентрацией, но не с максимальным полем. Заметим, что и в двумерной пылевой плазме структуры формируются в плазменном слое, где

потоки плазмы тоже интенсивны, но не из-за плотности, а высокой скорости ионного потока, определяемого критерием Бома [15, 16], а их результат не так эффективен как в тлеющем разряде.

Активно управляя потоком плазмы, идущим через пылевую ловушку, можно изменять баланс сил, участвующих в удержании пылевых частиц. В недавних исследованиях [17] были подобраны одинаковые разрядные параметры (давление, ток) при которых созданы пылевые структуры во всех инертных газах от гелия до ксенона и определены размеры левитирующих в каждом газе частиц. Оценки силы ионного увлечения для различных газов дали представление об изменении потоков ионов сквозь структуры и о возможности управления левитацией.

В итоге, на основе работ [8, 14, 17–19] сформировалось представление о возможности варьирования потока плазмы через изменение сорта газа, размера частиц, электрического поля, энергии электронов, плазменной плотности и магнитного поля. При этом азимутальный поток ионов, вызванный магнитным полем, будет «визуализироваться» наблюдением вращения пылевой структуры, работающей в качестве «пылевых зондов».

В настоящей работе ставится задача сопоставления механического состояния пылевой структуры в паре инертных газов в наложенном магнитном поле такого диапазона, в котором доминирует вращение из-за силы ионного увлечения [20, 21]. Подобраны условия разряда и размер пылевых частиц, при которых можно зарегистрировать и сопоставить скорости вращения в разных газах между собой и связать их с параметрами плазмы.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

### 2.1. Постановка задачи

Действие плазменного потока на статические и динамические характеристики пылевых структур представляет большой интерес для ряда задач. Более сильное воздействие оказывает ионный поток, который обычно учитывается через силу ионного увлечения. С помощью данного воздействия можно управлять пылевой структурой при изменении параметров разряда, например, при выборе сорта газа, или магнитным полем, поскольку направленная скорость  $U_{i\phi}$  зависит от него как  $U_{i\phi} = \omega_i \tau_i U_{ir}$ , где  $U_{ir}$  — азимутальная ско-

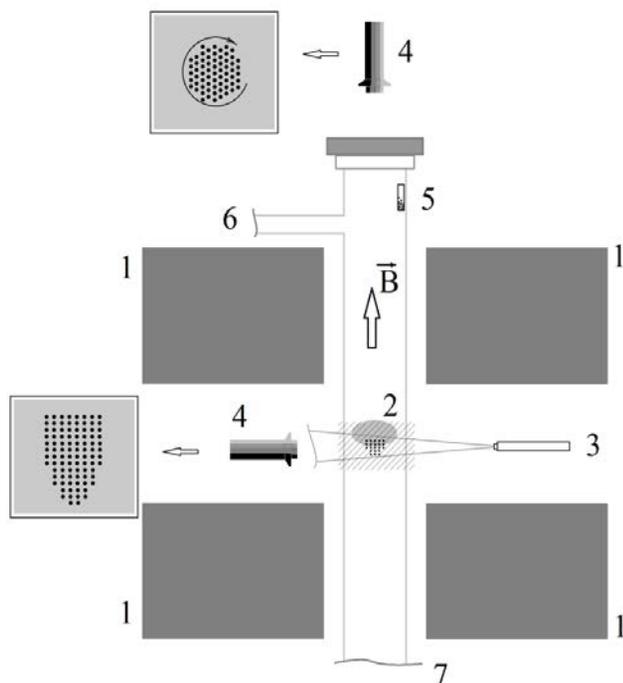
рость иона в магнитном поле,  $\omega_i$  — ионная циклотронная частота,  $\tau_i$  — время между столкновениями ионов с атомами газа,  $U_{ir}$  — скорость радиального потока ионов.

Если взять два рабочих газа, то помимо разной массы ионов  $m_i$ , существенная разница действия потоков ионов на пылевую частицу будет из-за различия плавающего потенциала, электрических полей (из-за разницы потенциалов ионизации) и транспортных частот. В выборе пары газов для сравнения действия потоков на пылевые частицы одного размера нужно учесть и разность масс, и разность потенциалов ионизации. У наиболее легких газов (неона и гелия) отношение масс велико, равно 5, но потенциалы ионизации различаются всего на 12%. У тяжелых же газов (ксенона и криптона) отношение масс около 1.5, но потенциалы ионизации отличаются на 15%. Мы выбрали пару газов, неон и аргон, прежде всего, потому что при отношении масс 2, разность потенциалов ионизации достаточно велика — 6 эВ (отношение почти 1.4). И, кроме того, пылевая плазма в неоне в магнитном поле в тлеющем разряде достаточно изучена, а в аргоне до сих пор не исследована совсем.

Если сравнивать тепловые потоки ионов  $n_i V_{Ti}$  ( $n_i$ ,  $V_{Ti}$  — концентрация и тепловая скорость ионов), то в типичных для пылевой плазмы условиях в этих газах они разнятся не более чем на 30%. Дрейфовые радиальные потоки, (важные в условиях наложения магнитного поля)  $n_i U_{ir}$ , дают отношение того же порядка. Но отношение азимутальных потоков  $n_i U_{i\phi}$  в диапазоне магнитного поля до замагничности электронов уже велико. Поток в неоне больше, в зависимости от условий, в 2–3.5 раза.

### 2.2. Описание экспериментальной установки, выбор условий и размеров частиц

Эксперимент проводился в стандартной для исследований лабораторной установке [7, 14]. Разрядная трубка с внутренним диаметром 2.7 см и длиной порядка 80 см, помещенная в сплит-систему магнитных катушек, могла перемещаться вдоль оси разряда, позволяя тем самым помещать исследуемый объект в однородное магнитное поле (в середину зазора между катушками), рис. 1. Сбоку в зазоре, длина которого составляла 9 см, велось визуальное наблюдение за смещением страты вдоль оси разряда, а так же фиксировалось положение исследуемого сечения плазменно-пы-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. Условные обозначения: 1 – магнитные катушки (сплит-система); 2 – страта с левитирующей пылевой структурой; 3 – система подсветки (вертикально или горизонтально ориентированный лазерный нож); 4 – видеокамера, снимающая вертикальное или горизонтальное сечение структуры; 5 – контейнер для инъекции пылевых частиц; 6 – анод; 7 – катод. Штриховкой обозначена область однородного магнитного поля.

левой структуры относительно начала страты. Подсветка горизонтальных сечений пылевых структур выполнялась «лазерным ножом», сформированным излучением полупроводникового лазера длиной волны 450 нм и мощностью 40 мВт с помощью цилиндрической линзы. Наблюдение за динамикой пылевой структуры и видеозапись производились через верхнее торцевое окно разрядной камеры. Для наблюдения за состоянием пылевой структуры лазерный нож разворачивался вертикально, и производилось фотографирование продольного сечения структуры.

Исходя из постановки задачи и проведенных ранее исследований об измерении размера левитирующих частиц в различных инертных газах [17], были выбраны следующие параметры для создания пылевой плазмы. Давление газа подбиралось из условий левитации объемной пылевой структуры, т.е. чтобы в горизонтальном сечении было, как минимум, три замкнутых «оболочки» из частиц, исключающие возникновение пороговых

**Таблица 1.** Представлены приращения характерного размера  $\Delta D$  пылевой частицы, левитирующей в страте инертного газа и разница  $\Delta E_i$  в потенциалах ионизации атомов соответствующих газов

	He–Ne	Ne–Ar	Ar–Kr	Kr–Xe
$\Delta D$ , мкм	0,5	0,7	0,8	1,3
$\Delta E_i$ , эВ	2,9	5,8	1,8	1,9

эффектов при вращении пылевых структур в магнитном поле [22]. В итоге давление варьировалось для аргона (Ar) в пределах 0.16 до 0.35 Торр и для неона (Ne) в пределах 0.25 до 1.03 Торр. Разрядный ток для всех экспериментов выбирался одинаковый 1.5 мА.

Выбор пылевых частиц основан на работе [17]. Необходимые данные мы приводим в табл. 1. Анализируя их, можно выделить удобные условия в паре газов в Ar и в Ne. Так, если рассматривать по данным таблицы приращение размера пылевой частицы ( $\Delta D$ ) при изменении потенциала ионизации, то видно, что для эксперимента с одинаковыми калиброванными частицами данные газы наиболее пригодны. В них изменение потенциала ионизации  $\Delta E_i$  около 6 эВ при минимальном изменении размеров частиц. Таким образом, в этой паре газов выполняется условие, чтобы частицы одного размера могли левитировать в обоих газах при одинаковых или близких величинах давлений: в исследовании мы использовали два сорта частиц: меламин формальдегида MF-5.19 мкм и MF-4.04 мкм.

### 3. ВРАЩЕНИЕ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В РАЗНЫХ ГАЗАХ ПРИ ОДИНАКОВЫХ ПАРАМЕТРАХ РАЗРЯДОВ И ПРИ ОПТИМАЛЬНЫХ ОБЪЕМАХ СТРУКТУР

В первой серии экспериментов мы, согласно работе [17], выбрали условия, благоприятные для создания пылевой структуры в аргоне, (поскольку в неоне пылевая плазма существует в довольно широком диапазоне параметров): размер частиц 5 мкм, давление газа 0.33 Торр. Но в магнитном поле до 200 Гс скорость вращения пылевой структуры в аргоне оказалась больше чем в неоне, в зависимости от условий, до 10 раз. Это совершенно не соответствует предварительным оценкам потоков, как говорилось выше. Более того, в данной более широкой разрядной трубке и с частицами меньшей плотности, чем в [17], при одинаковом давлении пылевые структуры в магнитном поле

не формировались. Диапазоны давления для аргона и неона, при которых существует устойчивое вращение пылевой плазмы в магнитном поле, видны на рис. 2а. Если экстраполировать указанные там зависимости к среднему давлению около 0.5 Торр, то экспериментально определенное отношение угловых скоростей в неоне и аргоне составило  $\omega_{Ne}/\omega_{Ar} = 0.1$ , в то время как оценки показывают величины в 20 раз больше (см. далее формулу (1)).

Для того чтобы попасть в область давления, когда в обоих газах существует устойчивое вращение в магнитном поле, пылевые частицы были заменены на меньшие – размером 4 мкм. Типичные зависимости угловой скорости вращения от магнитной индукции в двух газах для пылевых структур из частиц MF-4.04 мкм представлены на рис. 3. Для пылевых структур из частиц MF-5.19 мкм зависимости имели схожий характер, мы их

не приводим. На каждом графике на рис. 3. отмечен минимум зависимости ( $\omega_{min}$  – величина угловой скорости, которой достигает пылевая структура при вращении, в том диапазоне магнитного поля, когда преобладает сила ионного увлечения). Эта величина ( $\omega_{min}$ ) достигается при немного различающихся значениях магнитной индукции в зависимости от давления плазмоформирующего газа, но находящихся в интервале от 50 до 100 Гс. Графики на рис. 2 показывают, как зависит минимальное значение угловой скорости в двух газах при использовании частиц различных размеров в качестве пылевой компоненты. Заметим, что данные рис. 2б хорошо согласуются с работой [17], где левитация пылевых частиц в данных газах проведена именно при давлении  $p = 0.33$  Торр.

Несмотря на замену частиц, позволившую формировать пылевые структуры при одинаковых параметрах разрядов, а также то, что ширина структур

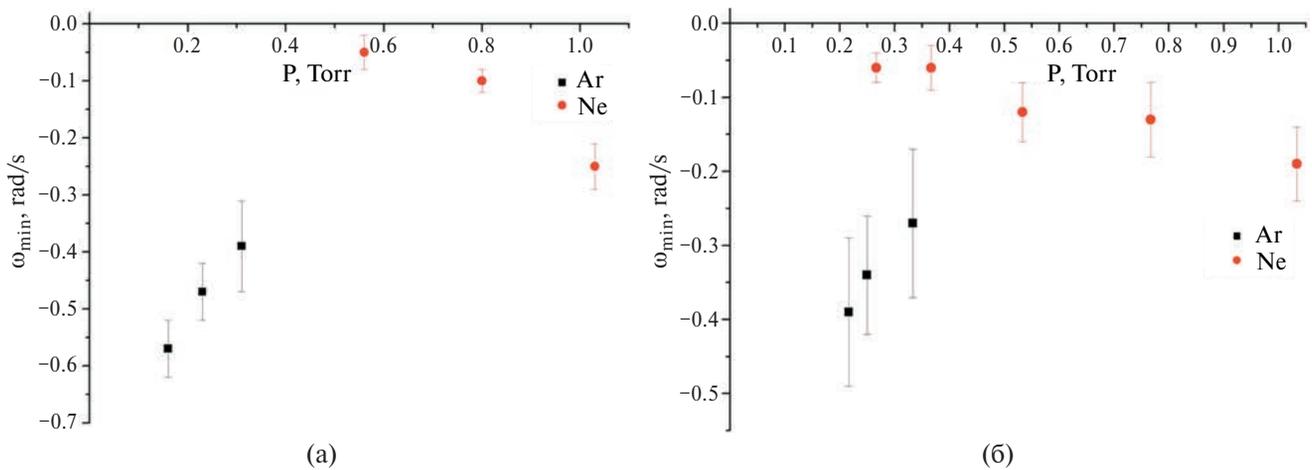


Рис. 2. а) Зависимость минимальной угловой скорости от давления для двух газов, размер частиц – 5 мкм; б) зависимость минимальной угловой скорости от давления для двух газов, размер частиц – 4 мкм.

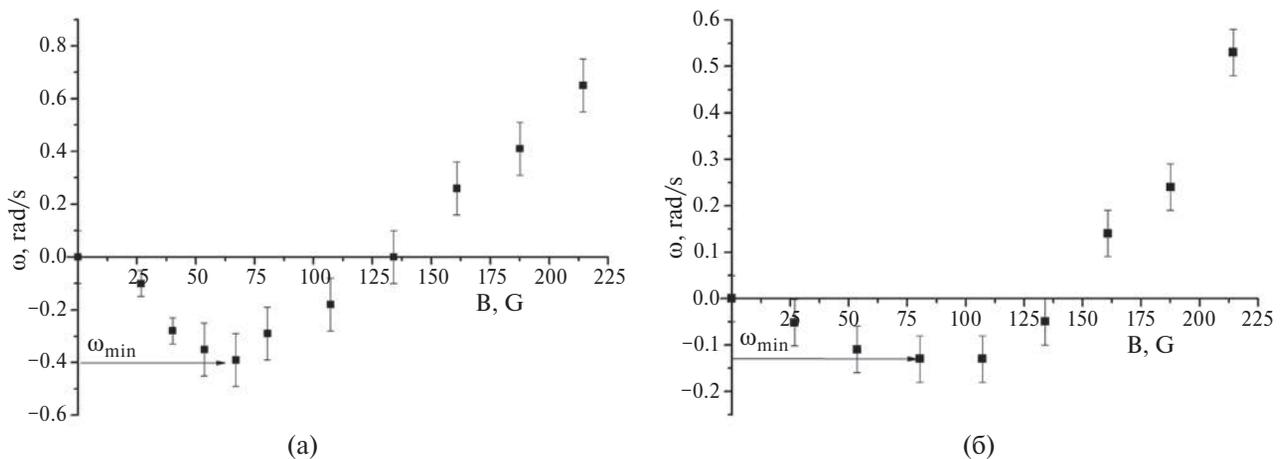


Рис. 3 Зависимость угловой скорости вращения пылевой структуры от величины магнитной индукции. Условия: а) газ Ar,  $P = 0.22$  Торр, размер частиц – 4 мкм; б) газ Ne,  $P = 0.76$  Торр, размер частиц – 4 мкм.

в горизонтальной плоскости была достаточной для отсутствия порогового эффекта, уменьшающего скорость вращения [22], угловая скорость вращения в Ne все равно оказалась меньше, чем в Ar. Рассмотрим это детально. Скорость вращения в магнитном поле в условиях, когда доминирует механизм ионного увлечения, дается выражением

$$\omega = \frac{n_i m_i V_{T_i} \omega_i \tau_i U_{ir} V_T \left\{ 1 + \frac{z\tau}{2} + \frac{z^2 \tau^2}{4} \Pi \right\}}{\gamma_d P} \quad (1)$$

Это формула получается из баланса силы ионного увлечения и тормозящей силы Эпштейна. Выражение для силы ионного увлечения дается формулой [1–3]

$$F_{id} = \frac{8\sqrt{2}\pi}{3} a^2 n_i m_i V_{T_i} U_{i\phi} \left\{ 1 + \frac{z\tau}{2} + \frac{z^2 \tau^2}{4} \Pi \right\}, \quad (2)$$

где  $m_i$  – масса ионов,  $\Pi = 1 -$  модифицированный кулоновский логарифм [1–3],  $P$  – давление газа,  $\tau = T_e/T_i$  – отношение электронной температуры

к ионной,  $Z = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_d e^2}{akT_e}$ ,  $eZ_d$  – заряд пылевой

частицы,  $U_{i\phi} = \omega_i \tau_i b_i E_r$ ,  $b_i$  – подвижность иона,  $E_r$  – радиальное электрическое поле,  $a$  – радиус пылевой частицы. Сила Эпштейна определяется выражением [1–3]

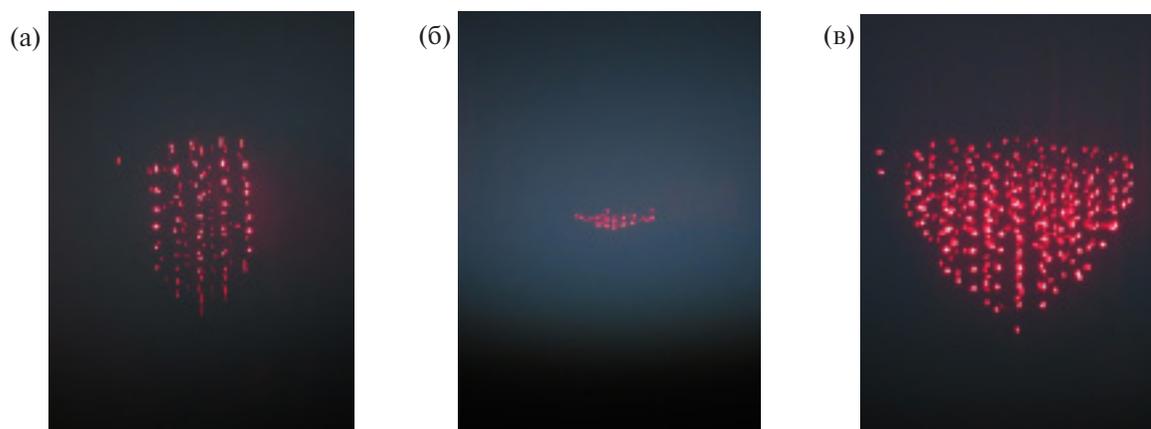
$$F_{Ep} = \frac{8\sqrt{2}\pi}{3} \gamma a^2 n_n k T_n \frac{U_d}{V_T}, \quad (3)$$

где  $n_n$ ,  $T_n$ ,  $V_T$  – концентрация, температура и тепловая скорость нейтралов,  $\gamma$  – коэффициент порядка единицы, определяемый особенностями взаимодействия нейтралов с поверхностью частицы,  $U_d$  – скорость пылевой частицы. Отношение скоростей вращения (1) дает значение  $\omega_{Ne}/\omega_{Ar}$  в зависимости от выбора параметров плазмы порядка 1.5–2.0.

Этот несколько парадоксальный результат не соответствует представлению о потоках, идущих через пылевую структуру, как говорилось выше. Анализируя проблему, мы связали данное наблюдение с различным продольным размером пылевой структуры. Следуя предложенным в [23] подходу и терминологии для ВЧИ-разряда, можно сказать, что в условиях разряда в неоне Ne при давлении 0.33 Торр пылевая структура оказалась «насыщенной» и максимальное количество частиц, которые могут левитировать оказалось ограниченным. Для используемых частиц в дан-

ных условиях в пылевой ловушке не существует свободных вакансий: новые частицы при инжекции либо не захватываются, либо вытесняют из структуры другие частицы, занимая их место. Можно сказать, что проблема заключается в неоптимальных условиях разряда, а не в «деградации» частиц во времени, как, например, наблюдалось в работе [24]. Если выбранные для аргона условия оказались оптимальными для работы в магнитном поле, то в используемой относительно широкой разрядной трубке с частицами малой плотности сформированные структуры в неоне оказались продольно не протяженными. Вид сбоку структуры в аргоне в магнитном поле демонстрируется на рис. 4а. В неоне же при давлении 0.33 Торр (рис. 4б) наглядно демонстрирует отличие структуры по объему (по длине структуры). Представленное фото соответствует эксперименту, который попал на область оптимальных параметров для создания большой пылевой структуры в аргоне. В неоне же оптимальными условиями для существования объемной пылевой структуры из частиц 4 мкм являются давления от 0.5 до 1.0 Торр. Рисунок 4в демонстрирует объемную пылевую структуру в Ne при давлении 0.76 Торр. При увеличении давления газа неона до 1.0 Торр, пылевая структура из тех же частиц 4 мкм увеличивает продольный размер. Полученная в эксперименте скорость в Ne (при том же токе разряда и давлении 0.76 Торр) в магнитном поле дает иное соотношение скоростей вращения  $\omega_{Ne}/\omega_{Ar}=0.5$ . Это изменение в оценке связано, прежде всего, с разностью концентрации ионов, скорости их потока, замагниченности и трения газа.

Таким образом, за величину скорости вращения отвечает некий набор условий, – для различных газов и размеров частиц результаты могут существенно различаться. Поэтому численная оценка скорости вращения при меньшем давлении 0.3 Торр дает большее значение для Ne, в то время как при 0.76 Торр большее значение получается для Ar. В эксперименте же стабильно воспроизводящиеся скорости вращения наблюдаются только с протяженными пылевыми структурами: если в одном газе, то с разными размерами частиц в разных фазах страты [25, 26] (как в работе [14]), или же, если в разных плазмоформирующих газах, то в одной фазе страты как в настоящей работе.



**Рис. 4.** Фотографии вертикального сечения пылевой структуры. Условия: а) газ Ar, давление 0.22 Торр мм, частицы 4 мкм, магнитная индукция  $B = 0$ , Ширина изображения 5.86 мм; б) газ Ne, давление 0.26 Торр, частицы 4 мкм,  $B = 54$  Гс. Ширина изображения 6.6 мм, в) газ Ne, давление 0.76 Торр, частицы 4 мкм,  $B = 0$ . Ширина изображения 3.67 мм.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное сравнение действия ионного потока, идущего через объемную пылевую структуру, на ее динамические характеристики в магнитном поле в двух инертных газах с различающимися потенциалами ионизации. Пылевые частицы используются как «пылевые зонды» для определения действия потока на угловую скорость вращения плазменно-пылевых структур. Рассматривается азимутальная составляющая потока в магнитном поле, действие потока оценивается через силу ионного увлечения. В результате сравнения получились следующие результаты.

Показано, что в эксперименте невозможно сопоставить характеристики вращения структур в Ne и Ar в идентичных разрядных условиях из-за «насыщения» пылевых структур вне области оптимальных условий их формирования. Экспериментальные значения скорости вращения сечений соответствуют численным оценкам только при больших пылевых структурах (полученных в оптимальных условиях): в Ar до давления 0.35 Торр, в Ne при давлении выше 0.7 Торр,  $\omega_{Ar} = -2.7$  рад/с и  $\omega_{Ne} = -1.3$  рад/с соответственно.

Впервые измерена угловая скорость вращения пылевой структуры в страте в Ar. Было замечено, что в области значений магнитной индукции до 500 Гс она на два порядка превосходит скорость в аргоне, наблюдаемую в монослое в ВЧ-разряде.

Сопоставлены геометрические размеры структур, формируемых в обоих инертных газах в магнитном поле. Определено, что для устойчивого

вращения объемной плазменно-пылевой структуры необходимо наличие 5–10 горизонтальных сечений, состоящих из минимум 19 частиц (т. е. двух замкнутых оболочек из частиц).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Экспериментальная часть работы при поддержке РНФ, грант № 22-72-10004, теоретическая часть – Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-00270-24-00.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fortov V.E., and Morfill G.E.* Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. New York: Taylor and Francis, 2010.
2. *Фортвов В.Е., Петров О.Ф., Молотков В.И.* и др. // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495.
3. *Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И.* Лабораторная пылевая плазма в магнитном поле. СПб.: Свое издательство, 2016.
4. *Samaritan A.A. and James B.W.* // Plasma Phys. Control. Fusion 2005. V. 47. P. B629.
5. *Beckers J., Ockenga T., Wolter M., Stoffels W.W., van Dijk J., Kersten H., and Kroesen G.M.W.* // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 115002.
6. *Ashrafi K.S., Yousefi R., Chen M.D., Matthews L.S. and Hyde T.W.* // Phys. Rev. E. 2020. V. 102. P. 043210.
7. *Karasev V.Yu., Dzglieva E.S. and Pavlov S.I.* // EPL 2015. V. 110 P. 55002.
8. *Майоров С.А.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. С. 869.
9. *Антупов С.Н., Васильев М.М., Майоров С.А., Петров О.Ф., Фортвов В.Е.* // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. № 3. С. 554.

10. *Maierov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., Dosbolayev M.K.* // *Physics of Plasmas*. 2008. Т. 15. № 9. P. 093701.
11. *Дзлiewa E.C., Майоров С.А., Новиков Л.А., Павлов С.И., Балабас М.В., Крылов И.Р., Карасев В.Ю.* // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. № 10. С. 1.
12. *Дзлiewa E.C., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю., Павлов С.И., Новиков Л.А., Майоров С.А.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2014. Т. 100. № 11–12. С. 801.
13. *Pavlov S.I., Dzliewa E.S., Karasev V.Y., Ermolenko M.A., Novikov L.A., Maierov S.A.* // *Contrib. to Plasma Physics*. 2016. Т. 56. № 3–4. С. 221.
14. *Павлов С.И., Дзлiewa E.C., Дьячков Л.Г., Новиков Л.А., Балабас М.В., Карасев В.Ю.* // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. № 10. С. 995.
15. *Райзер Ю.П.* *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1992.
16. *Грановский В.Л.* *Электрический ток в газе. Установившийся ток*. М.: Наука, 1971.
17. *Дзлiewa E.C., Карасев В.Ю., Новиков Л.А., Павлов С.И., Голубев М.С., Машек И.Ч.* // *ЖТФ*. 2023. Т. 93. № 10. С. 1429.
18. *Майоров С.А.* // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2012. № 2. С. 31–39.
19. *Майоров С.А., Клузов Б.А.* // *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2013. № 10. С. 19–32.
20. *Nedospasov A.V.* // *EPL*. 2013. V. 103 P. 25001.
21. *Васильев М.М., Дьячков Л.Г., Антипов С.Н., Петров О.Ф., Фортвов В.Е.* // *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т. 86. № 6. С. 414.
22. *Novikov L.A., Pavlov S.I., Dzliewa E.S., Tarasov S.A., Yanitsin D.V., Karasev V.Yu.* // *High Temp. Mater. Processes*. 2024. V. 28. I. 1. P. 55.
23. *Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А.* *Пылевая плазма, Эксперимент и теория*. М.: Физматлит, 2009.
24. *Kononov E.A., Vasiliev M.M., Vasilieva E.V., Petrov O.F.* // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 2931.
25. *Golubovskii Yu.B., Kozakov R.V., Maierov V.A., Behnke J. and Behnke J. F.* // *Phys. Rev. E*. 2000. V. 62. P. 2707.
26. *Голубовский Ю.Б., Кудрявцев А.А., Некучаев В.О., Порохова И.А., Цендин Л.Д.* *Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме*. СПб.: Издательство С.-Пб. университета, 2004.

## EFFECT OF PLASMA FLOWS IN A MAGNETIC FIELD ON THE DUSTY STRUCTURES IN DIFFERENT INERT GASES

**S. I. Pavlov<sup>a,\*</sup>, E. S. Dzliewa<sup>a</sup>, L. G. Dyachkov<sup>b</sup>, M. S. Golubev<sup>a</sup>, M. B. Morozova<sup>a</sup>,  
L. A. Novkov<sup>a</sup>, V. Yu. Karasev<sup>a,\*\*</sup>**

<sup>a</sup>*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

<sup>b</sup>*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: s.i.pavlov@spbu.ru*

<sup>\*\*</sup>*e-mail: plasmadust@yandex.ru*

The effect of the dust grain flows on a spatial dusty structure in a stratum of a glow discharge in two inert gases (neon and argon) in a weak magnetic field was studied. The discharge parameters were determined that are necessary for the creation of three-dimensional dusty structures made from dust grains of the same size in both gases in a magnetic field. The dependences were obtained of the angular velocities of the dusty structures in the two gases on the magnetic field and on the gas pressure. The rotation speeds of the dust grains in the magnetic field were used to compare the ion fluxes acting on the dust formations.

*Keywords:* dusty plasma, magnetic field, glow discharge, standing strata, dusty structures