

О ВЛИЯНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

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

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

^b Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*e-mail: plasmadust@yandex.ru

**e-mail: v.karasev@spbu.ru

Поступила в редакцию 09.09.2022 г.

После доработки 10.10.2022 г.

Принята к публикации 01.11.2022 г.

Определены и сопоставлены между собой характеристики объемных пылевых структур, создаваемых в трех пылевых ловушках в тлеющем разряде. Устойчивыми в наложенном магнитном поле с индукцией до 2 Тл являются следующие пылевые ловушки: стоячая страта, область сжатия канала тока (внутри специальной диэлектрической вставки), область разряда, находящаяся в сильно неоднородном магнитном поле. Представлены геометрические характеристики объемных пылевых структур и особенности динамики их вращения: продольного и поперечного относительно вектора магнитной индукции размера, угловой скорости, ее продольного градиента в каждой из пылевых ловушек. Проанализированы отличия экспериментально полученных характеристик объемных пылевых структур в сильном магнитном поле в тлеющем и ВЧ-разрядах.

Ключевые слова: пылевая плазма, магнитное поле, тлеющий разряд, стоячие страты, замагниченные ионы

DOI: 10.31857/S0367292122601138, EDN: NQRMUR

1. ВВЕДЕНИЕ

Объемные плазменно-пылевые структуры – более притягательные объекты по сравнению с двумерными монослоями в силу больших возможностей для их изучения, начиная с процесса упорядочивания и формирования возможных кристаллических упаковок, до воздействия на направленных плазменных потоков в изотропной и анизотропной плазменной среде, зарядки и динамики [1–3]. Магнитное поле представляет собой один из видов воздействий, накладываемых на пылевую плазму для ее экспериментального исследования посредством изучения отклика, и активно применяется в последнее время [4, 5]. Его особенностью является избирательное действие на каждую компоненту плазмы [6] и раздельное влияние на пылевую структуру и удерживающую ее пылевую ловушку [7]. Для понимания процессов и разделения этих влияний требуется объемная пылевая структура, а значит нужно создать специальные пылевые ловушки, способные устойчиво работать в сильном магнитном поле. Влияние магнитного поля на пылевые структуры представляет интерес также как способ управления ими в различных технологических процессах,

где их возникновение является обычно негативным фактором и существует задача их устранения.

Для обеспечения воздействия на пылевую плазму магнитным полем широкого диапазона до сих пор применялись ловушки в ВЧ-разряде емкостного типа [8–14], в которых создаются 2D-структуры – пылевые монослои (или структуры из нескольких монослоев). Ранние исследования в сильном магнитном поле с индукцией до 1 Тл выявили проблемы с устойчивостью тлеющего разряда [14], и вместо него стали применять ВЧ-разряд обычно в более “стабильном” для экспериментов газе Ar. Но и в этих условиях пылевая ловушка в магнитном поле является технически сложным объектом. Влияние на фоновую плазму велико: наблюдается филаментация [9] (разделение разряда вдоль магнитного поля на отдельные нити), как следствие, расщепление единого пылевого диска; гриддинг-эффект [10] (влияние электродов в магнитном поле на траектории движения пылевых частиц). Применение обжимающего пылевую структуру дополнительного кольца [15] также не привело к стабильному объемно-

му пылевому образованию, как это осуществлялось в отсутствие магнитного поля.

В работе [16] впервые удалось создать пылевую плазму в виде объемной структуры в ловушке в стоячей страте в магнитном поле с индукцией до 1 Тл. В работах [17–19] пылевая плазма в сильном магнитном поле (с замагниченными ионами) создавалась в объемных пылевых ловушках, хотя их применение было связано с множеством технических проблем. В разряде постоянного тока в магнитном поле возникают неустойчивости [7, 20], уменьшающие диапазон исследований [21, 22]. Каждая из работ [16–19] была выполнена при ограниченном наборе параметров: магнитная индукция, сорт газа, давление, ток разряда, вид ловушки. Например, в [16] и [18] для диапазона поля до 2 Тл в стоячей страте пришлось отдельно подбирать параметры эксперимента для диапазонов магнитного поля от 0 до 1 Тл и от 1 до 2 Тл. Работы [16–19] сконцентрированы на технической возможности преодоления неустойчивостей в ловушках в магнитном поле, а также на теоретическом описании и поиске механизмов вращения лишь малых пылевых структур в них. Систематическое исследование и описание характеристик пылевых структур до сих пор не проводилось: геометрические размеры, влияние на них продольного магнитного поля, неоднородность структур, градиенты угловой скорости вращения и др. Первоначальный этап изучения оказался длительным, прежде всего потому, что помимо стоячей страты было обнаружено еще несколько объемных пылевых ловушек. В трех из них оказалось возможным стабильное удержание пылевой плазмы в сильном магнитном поле.

Цель данной работы – описание экспериментов, проводимых в тлеющем разряде с пылевыми ловушками, способными удерживать объемные пылевые структуры при наложении сильного магнитного поля. Сильное магнитное поле “обеспечивается” как величиной магнитной индукции, так и использованием более легких рабочих газов неона и гелия, по сравнению с стандартно применяемым аргоном. Проведены исследования в пылевых ловушках в стоячих стратах в однородном и неоднородном магнитном поле, а также в области сужения канала тока (внутри диэлектрической разрядной вставки). В этих ловушках оказалось возможным удерживать пылевую плазму в магнитном поле в диапазоне до ~2 Тл. Также представлены особенности динамики вращения объемных пылевых структур в этих ловушках и описана их связь с геометрическими изменениями структур в магнитном поле. На сегодняшний день это хотя и качественное, но первое описание объемных пылевых структур в сильном магнитном поле.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

2.1. Постановка эксперимента

При экспериментальных исследованиях с пылевой плазмой используется постоянное магнитное поле, вектор магнитной индукции которого связывается с ориентацией разрядной камеры в поле силы тяжести. В наших экспериментах он был направлен вертикально вверх. Схема эксперимента приведена на рис. 1, принципиально она не отличается от стандартной в отсутствие магнитного поля или в малых полях [4], но имеются некоторые особенности создания и применения пылевых ловушек. Сильное магнитное поле создавалось криомагнитом, в нижней части которого располагался одиночный сверхпроводящий соленоид длиной 20 см, обеспечивающий в центре максимальное магнитное поле до 2.5 Тл со степенью однородности не менее 99.9% в объеме

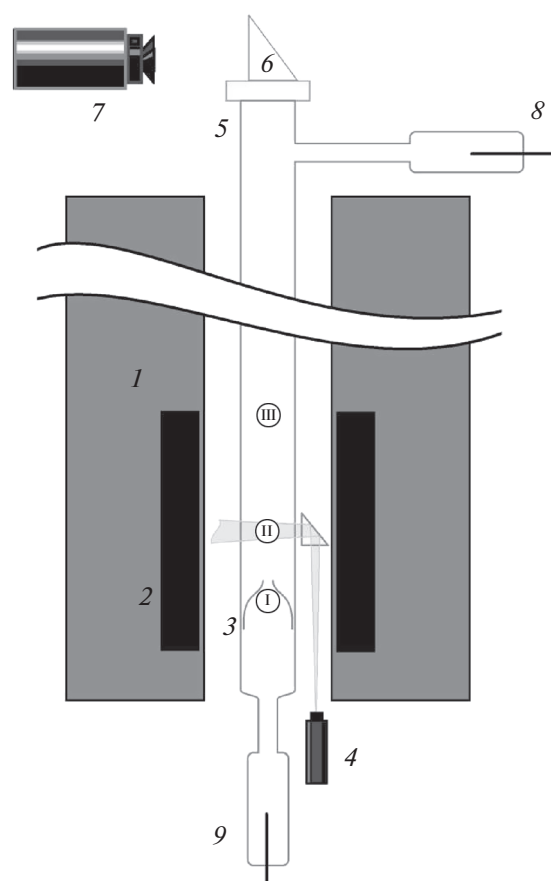


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и области существования пылевых ловушек: 1 – криостат, 2 – сверхпроводящий соленоид, 3 – разрядная трубка, 4 – система подсветки, 5 – торцевое оптическое окно, 6 – поворотная призма, 7 – видеокамера с длиннофокусным объективом, 8 – анод, 9 – катод; I – ловушка внутри разрядной вставки, II – ловушка в стоячей страте (первой от вставки), III – ловушка у верхнего торца соленоида.

1 см³. Криостат имел высоту 80 см и сквозное тепловое отверстие диаметром 6 см. В теплое отверстие размещались разрядная трубка диаметром около 2 см и перископическая система, обеспечивающая либо горизонтальную подсветку пылевой структуры лазерным ножом, либо прием свечения разряда с заданной высоты. При вертикальном перемещении перископической системы производилась подсветка определенного горизонтального сечения структуры в выбранной пылевой ловушке, а также сканирование всей пылевой структуры (либо свечения разряда) вдоль вертикальной координаты. Трубка ориентировалась катодом вниз, который выносился из области магнитного поля (для уменьшения проблемы возникновения неустойчивости разряда в магнитном поле [7]). В верхней части трубки располагались анод и контейнер с частицами для создания пылевой плазмы. В представленных экспериментах разряд зажигался в неоне или гелии, применялись частицы кварца или калиброванные частицы меламин-формальдегида. Разрядная трубка была снабжена верхним торцевым окном для видеосъемки подсвеченного сечения. В основном использовалась стандартная камера с частотой съемки 30 кадров в секунду, и при необходимости камера с повышенной скоростью видеосъемки (с частотой 250 кадров в секунду).

В тлеющем разряде система стоячих страт формируется в разрядной трубке от места сужения канала тока в сторону анода при применении разрядной диафрагмы — диэлектрической вставки. В случае исследований в однородном магнитном поле выбранная страта удерживается в центре магнитной катушки. При смещении страты по вертикали в магнитном поле, страта и структура в ней перемещались в середину соленоида путем сдвига трубки вдоль своей оси. Если в магнитном поле не развиваются неустойчивости разряда [7, 20], то пылевая структура при инжекции частиц может формироваться в магнитном поле 2 Тл и выше.

Геометрическая форма структуры зависит от формы страты, и она изменяется в магнитном поле. По мере увеличения магнитной индукции меняются параметры разряда. Прежде всего, изменяются коэффициент амбиполярной диффузии [4] и амбиполярное электрическое поле в используемом диапазоне магнитного поля [20]:

$$D_{am\perp} = \frac{D_{am}}{1 + \omega_e \tau_e \omega_i \tau_i},$$

$$E_{am} = - \frac{kT_e - kT_i (\omega_e \tau_e \omega_i \tau_i) \nabla n}{e(1 + \omega_e \tau_e \omega_i \tau_i) n}.$$

Здесь $\omega_\alpha \tau_\alpha$ ($\alpha = e, i$) — параметр Холла для плазменных частиц, $D_{am\perp}$ — коэффициент амбиполярной диффузии в магнитном поле. Было уста-

новлено, что при достижении замагниченности $\omega_e \tau_e \omega_i \tau_i = 1$ (например, при значениях $B = 0.1$ Тл и $p = 0.7$ Торр в Ne) разряд начинает радиально сжиматься, при этом изменяется форма пылевых структур в используемых ловушках. Если одна из страт оказывалась вблизи торца соленоида в сильно неоднородном магнитном поле, то ее геометрическая форма (определяемая по свечению) существенно изменялась. В зависимости от условий и типа применяемого порошка, в ней можно было создать пылевую структуру протяженностью до $h = 12$ см. Еще одна пылевая ловушка, обнаруженная в [23] в слабом магнитном поле, создавалась в удлиненном до 1 см горлышке разрядной вставки диаметром 4 мм. Она оказалась самой стабильной ловушкой при изменениях магнитного поля.

Для проведения работ с каждой из ловушек применялся набор разрядных трубок, отличающихся диаметром в 1–2 мм, размером диэлектрической вставки, размером используемых частиц, давлением и типом рабочего газа. Параметры подбирались экспериментально, исходя из получения устойчивых структур в магнитном поле. Например, в неоне, для ловушки в страте продуктивными оказались давление $p = 0.6–0.7$ Торр и частицы размером 5.5 мкм, для ловушки во вставке $p = 0.4$ Торр и частицы 2 мкм. Помимо перечисленных, в тлеющем разряде существуют объемные пылевые ловушки над нижней стенкой камеры [24] и в области низковольтной дуги [23], но в сильном магнитном поле пылевые частицы в них не удерживались.

2.2. Особенности пылевых ловушек

Наиболее используемой и изученной пылевой ловушкой в тлеющем разряде является *стоячая страта*. Ее длина в магнитном поле вне области аномальной диффузии увеличивается в соответствии с $L(B) = L(0) \sqrt{D_{am}/D_{am\perp}}$ [25]. В эксперименте наблюдалось, что в магнитном поле страта несколько удлиняется и сжимается радиально. На рис. 2а представлено характерное изображение среднего горизонтального сечения пылевой структуры. В условиях эксперимента (в Ne при давлении $p = 0.66$ Торр, частицы кварца 5.5 мкм) из 400 частиц в сечении в отсутствии магнитного поля после его увеличения до 2 Тл в сечении сохраняются порядка 10 частиц. Некоторые геометрические параметры структуры в магнитном поле приведены в табл. 1.

Второй пылевой ловушкой, устойчивой в сильном магнитном поле, является область *сужения канала тока* разряда. Сформированная здесь структура частицами кварца размером 2.0 мкм в Ne при давлении 0.4 Торр в магнитных полях до 0.01 Тл не изменяет своей формы. В поле порядка

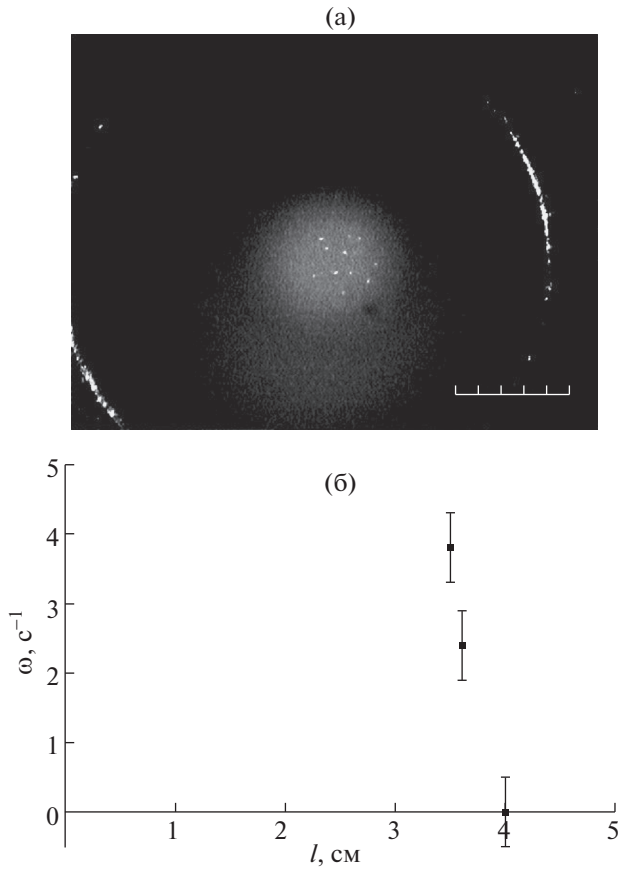


Рис. 2. Изображение сечения пылевой структуры в страте в неоне при $p = 0.7$ Торр, $i = 1.5$ мА, $B = 1.58$ Тл, цена деления шкалы на рисунке равна 1 мм (а); пример продольного изменения угловой скорости вращения при $B = 1.5$ Тл, условия соответствуют (а); l – продольная координата, отсчитываемая вверх от нижнего края свечения пылевой ловушки.

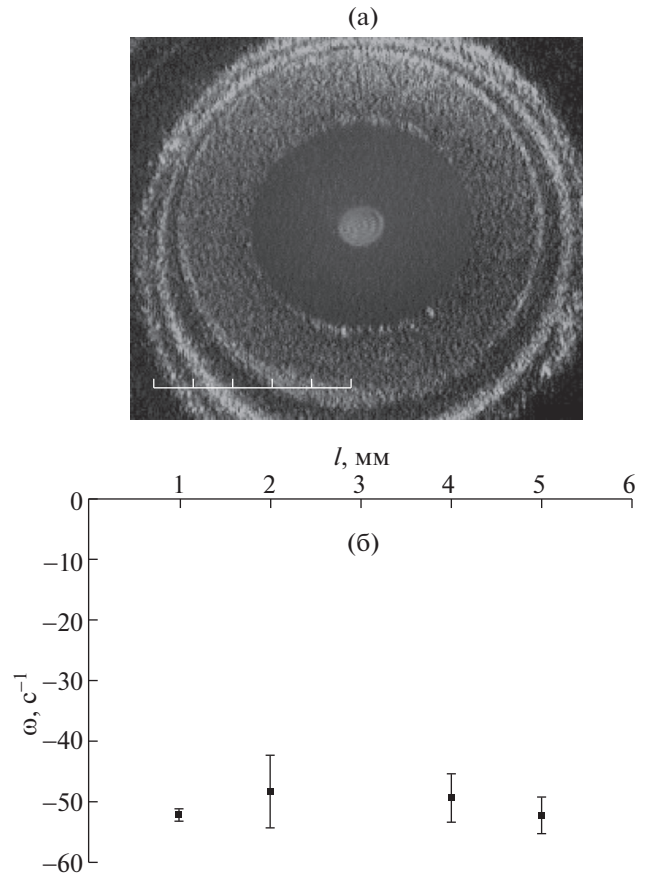


Рис. 3. Вращающаяся пылевая структура в ловушке в области сужения канала тока (а). При быстром вращении в поле более 1 Тл пылевое образование приобретает кольцевую форму, цена деления шкалы на рисунке равна 1 мм, $B = 1$ Тл. Пример продольного изменения угловой скорости вращения при $B = 2$ Тл, $p = 0.4$ Торр, $i = 2.5$ мА, Ne (б).

0.1 Тл происходит резкое радиальное сжатие структуры и уменьшение радиального межчастичного расстояния до 0.1 мм. В больших полях наблюдается только продольное вытягивание структуры, например, в поле $B = 1$ Тл ее длина порядка 0.5 см. В табл. 2 приведены геометрические параметры структуры в магнитном поле. В данной пылевой ловушке обнаружено рекордно быстрое вращение структуры в магнитном поле.

Таблица 1. Изменение параметров структуры в страте в магнитном поле: D_r – радиальный размер структуры, h – продольный размер структуры, N – число частиц в перпендикулярном магнитному полю сечении

	0 Тл	1 Тл	2 Тл
D_r	5 мм	1 мм	1 мм
h	5 мм	10 мм	5 мм
N	400	20	10

Начиная с магнитного поля, соответствующего замагниченности иона (в условиях эксперимента 1 Тл), пылевые частицы в перпендикулярных магнитному полю сечениях движутся по круговым орбитам, придавая структуре форму цилиндрических оболочек, вложенных одна в другую. Рисунок 3 демонстрирует появление такой оболочечной структуры. Данная пылевая ловушка также привлекательна для ее применения в сильном магнитном поле из-за высокой устойчиво-

Таблица 2. Изменение параметров структуры в области сужения канала тока в магнитном поле. Обозначения соответствуют табл. 1

	0 Тл	1 Тл	2 Тл
D_r	3 мм	1 мм	1 мм
h	3 мм	5 мм	5 мм
N	200	50	50

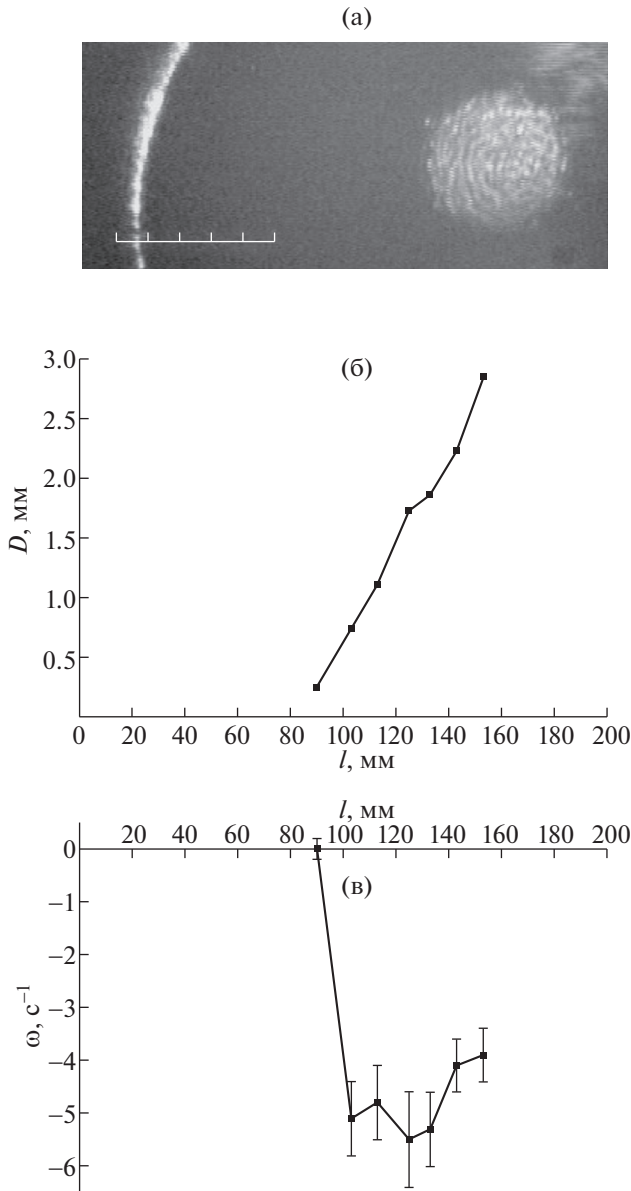


Рис. 4. Изображение вращающегося сечения пылевой структуры в неоднородном магнитном поле, цена деления шкалы на рисунке равна 1 мм (а); зависимости диаметра пылевой структуры (б) и скорости вращения от высоты над торцом соленоида (в). Условия: газ He, $p = 1.3$ Торр, $i = 1.5$ мА. На высоте 100 мм значение магнитной индукции 0.25 Тл, градиент магнитного поля 0.05 Тл/см.

сти. Например, в области развития неустойчивости в страте при 0.25–0.4 Тл, где происходит частичная потеря пылевых частиц, в данной ловушке наблюдается всего лишь радиальное смещение в масштабе не более одного межчастичного расстояния.

Третья устойчивая в магнитном поле пылевая ловушка формируется в области сильного и резко неоднородного магнитного поля. Если стоячая

страта располагается вне магнитной катушки вблизи ее торца, где магнитное поле неоднородно, она существенно деформируется. Форма наблюдаемого “плазмоида”, находящегося вблизи торца магнитной катушки (поле B спадает от центра к торцу от 2 до 1.2 Тл) изменяется, он существенно вытягивается. Например, в Ne при $p = 0.6$ Торр светящаяся область превышает 10 см. Сформированная в этой ловушке структура из полидисперсных частиц также имеет длину больше 10 см. При этом над торцом магнитной катушки дополнительно формируются пылевые цепочки примерно той же длины. Данная область разряда характеризуется максимальным продольным градиентом магнитного поля $dB/dl = 0.2$ Тл/см. Поскольку поле вблизи торца соленоида не максимально большое, удобно представить результаты измерений с более легким газом гелием, степень замагниченности иона в нем более высокая, $\omega_i \tau_i = 1.0$. Рисунок 4а показывает самое широкое сечение данной структуры в процессе вращения. На рис. 4б представлена зависимость диаметра горизонтального сечения структуры от вертикальной координаты в области большого градиента магнитной индукции.

3. ОБЪЕМНЫЕ ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Пылевые структуры в обсуждаемых ловушках в магнитном поле различаются своими геометрическими параметрами, степенью однородности и динамикой. В лабораторных и энергетических установках в магнитном поле пылевая структура и плазма приходят во вращение [4, 7, 26]. Обсуждаемые объемные пылевые структуры в [16–19] создавались лишь при ограниченном наборе параметров: диапазоне магнитной индукции, геометрической протяженности, неоднородности плазменных потоков. В предложенных физических моделях вращения предполагаются однородные непротяженные пылевые формирования. Рассмотрим отличие механизмов вращения и зависимости угловой скорости от магнитной индукции в обсуждаемых ловушках, и сопоставим их с наблюдаемой геометрией. Также сравним их результаты с исследованиями в ВЧ-разряде в сильном магнитном поле.

В стоячей страте в сильном магнитном поле вращение пылевой структуры связано с вращением газа из-за действия вихревого тока. Скорость вращения газа различна по направлению и по величине в разных фазах страты (при разных вертикальных координатах). К настоящему времени рассмотрены механизмы вращения для разных диапазонов магнитной индукции, в [16, 21] для $B < 1$ Тл, в [18] для B свыше 1 Тл. Особенности пылевой структуры в рассматриваемой пылевой ловушке являются небольшая скорость враще-

ния – порядка 1 рад/с, что обусловлено вязкостью газа, а также продольный градиент угловой скорости 8 рад/(с·см) (рис. 26). Это связано, возможно, с изменением геометрии объемной структуры, удлинением страты, с приближением пылевой структуры в ней к области фазы с обратным направлением вращения газа. Использование данной пылевой ловушки позволяет получить в сильном магнитном поле 2 Тл пылевую структуру, состоящую из порядка 100 частиц. Относительно стабильности можно сказать, что пылевая ловушка достаточно устойчива в диапазонах магнитного поля менее 0.25 Тл и выше 1.1 Тл.

В области сужения канала тока действует механизм ионного увлечения (вихревые токи характерные для страт здесь не возникают), и нужно учитывать изменение параметров разряда, прежде всего повышение плотности плазмы (ионов). Даже в относительно небольшом магнитном поле 0.01 Тл скорость вращения пылевых частиц здесь порядка 10 рад/с, что превышает данные любых других наблюдений как в тлеющем, так и в ВЧ-разрядах. В магнитном поле 1 Тл при токе разряда 3 мА скорость вращения достигает рекордной величины порядка 10^2 рад/с, что детектировалось посредством скоростной видеосъемки. Измеренное распределение скорости вращения вдоль продольной координаты показывает практически полное отсутствие ее градиента (рис. 36), что радикально отличается от сильно неоднородного вращения в стоячей страте.

Для ловушки в неоднородном магнитном поле модель вращения разработана для малых плоских структур, расположенных вблизи торца соленоида в магнитном поле до 0.04 Тл (когда форма страты еще не изменяется) [19]. Создание минимальной по протяжению структуры было обеспечено за счет использования монодисперсных частиц меламин-формальдегида диаметром 1 мкм. В модели учитывалось одновременное действие нескольких механизмов вращения, результаты действия которых сравнимы по величине. Положение структуры, ее геометрия, а также неоднородность вращения, сильно зависят от неоднородности магнитного поля. На рис. 4в представлено изменение скорости вращения горизонтального сечения с высотой в более протяженной структуре, сформированной из полидисперсных частиц кварца при продольной составляющей магнитного поля на торце соленоида 0.25 Тл. Максимальный градиент угловой скорости 0.5 рад/(с·мм). Заметим, что направление вращения в данной ловушке всегда обратное по отношению к направлению вращения в страте в сильном магнитном поле.

Полученные характеристики пылевых структур и проведенное их сравнение позволяют выбрать пылевую ловушку для конкретной задачи.

Пылевая ловушка в области сужения канала тока дает возможность создавать пылевую плазму в наиболее сильных и однородных электрическом и магнитном полях, и при повышенной плотности тока до 0.05 А/см^2 . Ловушка в страте позволяет создавать пылевую плазму в максимально неоднородных условиях (существенные градиенты T_e , E , неоднородное вращение газа), в ней удерживаются пылевые частицы наибольшего размера. Пылевая ловушка в сильно неоднородном магнитном поле позволяет формировать протяженные до 10 см нитевидные пылевые структуры. Вероятно, в ней возможно экспериментально моделировать пылевую плазму вблизи стенок энергетических установок [27].

Сопоставляя геометрические и динамические свойства рассмотренных объемных пылевых ловушек в тлеющих разрядах в магнитном поле со свойствами ловушек в ВЧ-разряде, можно отметить следующее. Угловая скорость пылевых структур на несколько порядков превосходит скорость вращения в ВЧ-разрядах, изученные структуры могут обладать существенной неоднородностью, как в расположении пылевых частиц, так и в скорости вращения. В магнитных полях в ВЧ-разряде наблюдается дифференциальное вращение по радиусу, в исследуемых в тлеющем разряде условиях радиальные неоднородности практически не проявляются. В силу эффекта филаментации, в ВЧ-разряде широкие монослои в сильном магнитном поле расщепляются на отдельные вихри, размеры которых в радиальном направлении сопоставимы с радиальным размером структур в тлеющем разряде.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В объемных пылевых ловушках в тлеющем разряде в сильном магнитном поле обнаружены следующие особенности у пылевых структур. В стоячей страте наблюдается наибольший продольный градиент угловой скорости. В области сужения канала тока удлинение структуры невелико и отсутствует продольный градиент скорости, абсолютное значение скорости вращения является рекордно большим. В сильно неоднородном магнитном поле формируются сверхпротяженные пылевые “нити”. Во всех описанных объемных пылевых ловушках впервые удалось выполнить измерения продольных градиентов угловой скорости и определить протяженность структур.

Выделяя особенности объемных пылевых структур в ловушках в тлеющем разряде, следует отметить, что в сильном магнитном поле в ВЧ-разряде вследствие его филаментации широкие пылевые монослои расщепляются на отдельные пылевые вихри сопоставимые по размеру с пыле-

выми структурами в исследованных ловушках тлеющего разряда. В магнитном поле свыше 1.1 Тл пылевые структуры во всех ловушках в тлеющем разряде достаточно устойчивы. Эти факторы делают объемные пылевые ловушки в сильном магнитном поле более привлекательными для изучения пылевой плазмы.

Экспериментальная часть работы в He поддержана грантом РФФИ № 22-12-00002; в He грантом РФФИ № 22-72-10004; теоретическая часть выполнена по госзаданию Мин. науки и высшего образования РФ № 075-01056-22-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. // УФН. 2004. Т. 174. С. 495.
2. Цытович В.Н., Морфилл Г.Е., Томас В.Х. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. С. 675.
3. Игнатов А.М. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 52.
4. Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И. Лабораторная пылевая плазма в магнитном поле. СПб.: Свое Издательство, 2016.
5. Karasev V.Y., Dzlieva E.S., D'yachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Tarasov S.A. // Contr. Plasma Phys. 2019. V. 59. P. e201800136.
6. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. // Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 384 с.
7. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971.
8. Kaw P., Nishikawa K., Sato N. // Phys. Plasmas. 2002. V. 9. P. 387.
9. Schwabe M., Konopka U., Vandyopadhyay P., Morfill G.E. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 215004.
10. Thomas E.Jr., Lynch B., Konopka U., Merlino R.L., Rosenberg M. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. P. 030701.
11. Konopka U., Samsonov D., Ivlev A.V., Goree J., Steinberg V., Morfill G.E. // Phys. Rev. E. 2000. V. 61. P. 1890.
12. Carstensen J., Greiner F., Hou L.J., Maurer H., Piel A. // Phys. Plasmas. 2009. V. 16. P. 013702.
13. Melzer A., Kruger H., Schutt S., Mulsow M. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. P. 093702.
14. Sato N. // AIP Conf. Proc. 2002. V. 649. P. 66.
15. Choudhary M., Bergert R., Mitich S., Thoma M.H. // Phys. Plasm. 2020. V. 27. P. 063701.
16. Dzlieva E.S., D'yachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu. // European Phys. Lett. 2018. V. 123. P. 15001.
17. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28. P. 085020.
18. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu. // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. P. 085020.
19. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu. // Molecules. 2021. V. 26. P. 3788.
20. Nedospasov A.V. // Phys. Rev. E. 2009. V. 79. P. 036401.
21. Vasiliev M.M., D'yachkov L.G., Antipov S.N., Huijink R., Petrov O.F., Fortov V.E. // European Phys. Lett. 2011. V. 93. P. 15001.
22. Абдирахманов А.Р., Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И., Новиков Л.А., Досболаев М.К., Коданова С.К., Рамазанов Т.С. // ТВТ. 2021. Т. 59. С. 657.
23. Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Павлов С.И. // Физ. Плазм. 2016. Т. 42. С. 147.
24. Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю. // Физ. Плазм. 2012. Т. 38. С. 591.
25. Недоспасов А.В. // УФН. 1968. Т. 94. С. 439.
26. Чен Ф. Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987.
27. Цытович В.Н., Винтер Дж. // УФН. 1998. Т. 168. С. 899.