

04.1

## Пылевая плазма в высокочастотном разряде индукционного типа в магнитном поле

© М.С. Голубев, Е.С. Дзалиева, В.Ю. Карасев, Л.А. Новиков, С.И. Павлов, И.Ч. Машек

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: maksider@yandex.ru, v.karasev@spbu.ru

Поступило в Редакцию 10 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 27 апреля 2024 г.

Принято к публикации 27 апреля 2024 г.

Впервые исследована пылевая плазма в высокочастотном индукционном разряде в магнитном поле. В магнитном поле с индукцией до 0.02 Т пылевая плазма приходит в устойчивое вращательное движение. Вектор угловой скорости структуры направлен противоположно вектору магнитной индукции. Получены зависимости скорости вращения структуры и среднего горизонтального межчастичного расстояния от величины магнитного поля. Направление вращения, полученная линейная зависимость от магнитной индукции и совпадение с теоретической оценкой величины угловой скорости вращения свидетельствуют о действии механизма ионного увлечения пылевых частиц в условиях эксперимента.

**Ключевые слова:** пылевая плазма, магнитное поле, высокочастотный индукционный разряд.

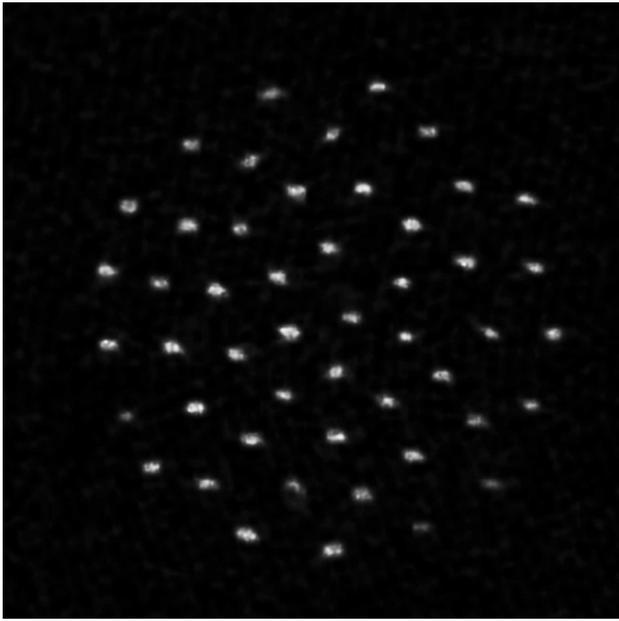
DOI: 10.61011/PJTF.2024.16.58531.19950

Пылевая плазма в форме объемных пылевых структур в магнитном поле является сложным объектом для экспериментального изучения. За пять лет, прошедших с момента получения трехмерных пылевых структур в поле до 2 Т [1], появилось лишь несколько работ [2,3], и почти все посвящены исследованиям в пылевой ловушке внутри вставки в разряд, где пылевая структура не обладает большой протяженностью. При работе в магнитном поле обычно используют монослойные пылевые структуры [4–7], для избегания неустойчивостей в магнитном поле применяют высокочастотный (ВЧ) разряд емкостного типа. Основные проблемы создания объемных пылевых структур в разряде постоянного тока связаны с возникающими в магнитном поле неустойчивостями [8]. Например, в [2] в поле 0.4–0.6 Т разряд терял симметрию, и пылевая ловушка деградировала, а в [9] в магнитном поле свыше 0.5 Т левитация пылевых частиц не наблюдалась. Одним из возможных решений для получения устойчивых пылевых структур является использование ВЧ-разряда индукционного типа (ВЧИ).

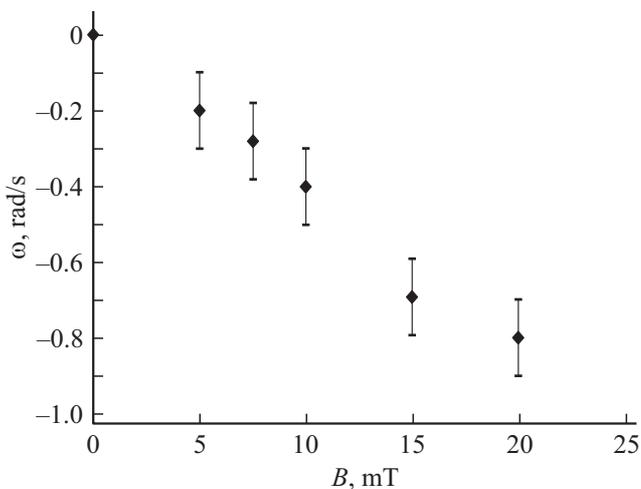
ВЧИ-разряд ранее использовался для создания пылевой плазмы в экспериментах [10,11], где в вертикальной трубке достаточно большого для пылевой плазмы диаметра (4 см) левитировали пылевые структуры из частиц размером менее 4 мкм. В магнитном поле, направленном поперек оси индуктора, ранее наблюдались отдельные облегченные (пустотелые) пылевые частицы диаметром 10 мкм в узкой (порядка 1 см) разрядной камере [12]. Таким образом, для создания пылевой плазмы в магнитном поле в условиях ВЧИ-разряда необходимо найти определенные условия как в отношении разряда и геометрии камеры, так и в отношении параметров порошка для создания пылевой плазмы.

Целью и приложением проводимого исследования является разработка объемной пылевой ловушки, стабильной в сильном магнитном поле. В работе последовательно решаются задачи создания объемных пылевых структур на диффузном крае плазмоида в ВЧИ-разряде, подбора условий для устойчивого существования пылевой плазмы в магнитном поле порядка величины замагниченности электронов, наблюдения ее скорости вращения, размеров и межчастичного расстояния в зависимости от величины и направления вектора магнитной индукции. Полученная динамика сопоставлена с оценками на основе сил, действующих на пылевую частицу, с использованием литературных данных о ВЧИ-разряде.

В соответствии с экспериментами [10–12] для подбора разрядных условий была сконструирована безэлектродная разрядная трубка с переменным сечением. Полная длина трубки 60 см, верхняя ее половина имела сечение диаметром 2.6 см, нижняя — 2.2 см, толщина стеклянной стенки 1.5 мм. Вверху к трубке припаяны два вакуумных крана, через один из которых производились откачка и напуск рабочего газа, а через другой — подача пылевых частиц путем размещения засыпного порошка в контейнере с сетчатым дном. Нижняя часть трубки свободно проходила в создающие магнитное поле катушки. Катушки разнесены на 7 см, что позволяло располагать индуктор на выбранном участке трубки, производить боковую подсветку лазером и видеонаблюдение за разрядом и формированием пылевой структуры. ВЧ-индуктор состоял из двух витков литцендрата (21 × 0.07), намотанных внатяг на трубку на расстоянии 12 мм (по одному витку на каждом выходе ВЧ-генератора). Генератор собран на лампе ГУ-29 по схеме мультивибратора с двумя выходами с общей точкой. Источником питания генератора служил УИП-1. Разрядная трубка откачи-



**Рис. 1.** Фотография горизонтального сечения пылевой структуры. Условия: газ — неон, давление  $0.33 \text{ Torr}$ , частицы меламин-формальдегида диаметром  $2 \mu\text{m}$ ,  $B = 18 \text{ mT}$ , ширина изображения равна  $2.7 \text{ mm}$ .



**Рис. 2.** Зависимость угловой скорости вращения центрального сечения пылевой структуры от магнитной индукции. Условия те же, что для рис. 1.

валась до давления  $10^{-4} \text{ Torr}$  и длительно отжигалась ВЧ-разрядом в неоне. Для создания пылевой плазмы выбраны следующие условия: газ — неон, давление  $\sim 0.3 \text{ Torr}$ , частота генератора  $40 \text{ MHz}$ , напряжение и ток УИП составляли  $U = 100\text{--}300 \text{ V}$  и  $I = 40\text{--}100 \text{ mA}$  соответственно. По нашей оценке вкладываемая в разряд мощность была не более  $0.4 \text{ W}$ .

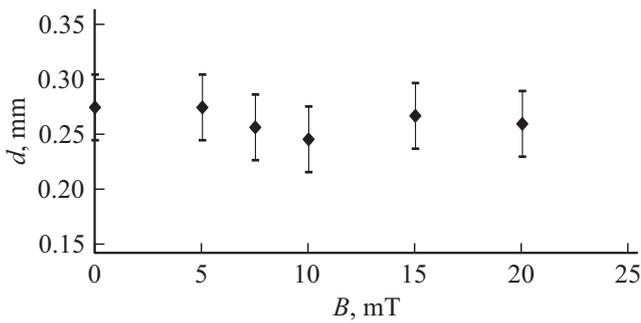
В предварительных экспериментах в отсутствие магнитного поля применялись калиброванные сферические частицы размером  $5 \mu\text{m}$  из меламин-формальдегида

плотностью  $1.5 \text{ g/cm}^3$ . При создании разряда в верхней (широкой) части трубки левитация частиц не происходила. В нижней (узкой) части трубки наблюдалась единственная пылевая цепочка. Далее пылевые частицы были заменены на частицы меньшего размера  $d = 2.05 \pm 0.05 \mu\text{m}$  той же плотности. В тех же условиях (напряжение источника  $U = 100 \text{ V}$ , ток источника  $80 \text{ mA}$ ) можно было наблюдать единственную пылевую цепочку в верхней части трубки и неширокую пылевую структуру в нижней части трубки. С ней в описанных условиях и были проведены эксперименты в продольном магнитном поле.

В эксперименте структура располагалась в однородном магнитном поле между катушками. Измерение скорости вращения производилось в среднем горизонтальном сечении пылевой структуры, которое содержало не менее двух оболочек, с целью избежать пороговых эффектов [13]. Диапазон магнитного поля ограничивался  $0.02 \text{ T}$ , что соответствует замагниченности электронной компоненты  $\omega_e \tau_e = 3$ , где  $\omega_e$  — циклическая частота,  $\tau_e$  — время между столкновениями электрона. Это превышает магнитное поле инверсии вращения для объемных пылевых структур в тлеющем разряде в неоне, что позволяет провести сравнение с пылевой ловушкой в тлеющем разряде [1,3].

В выбранных условиях созданная пылевая структура была объемной. В горизонтальном сечении она насчитывала до 30 частиц. В вертикальном направлении ее длина была около  $3 \text{ mm}$ , т.е.  $10\text{--}12$  пылевых слоев. Пылевое облако находилось в жидком нефиламентарном состоянии. Фотография характерного горизонтального сечения представлена на рис. 1. В магнитном поле пылевая структура приходила во вращение с отрицательной проекцией угловой скорости на вектор магнитной индукции. Низ структуры вращался медленнее остальной части. Центральное сечение структуры подсвечивалось горизонтальной лазерной плоскостью и снималось на видеокамеру сверху. На рис. 2 и 3 представлены зависимости от магнитной индукции угловой скорости вращения выбранного сечения и горизонтального межчастичного расстояния соответственно.

Обсуждая результаты, нужно отметить следующее. В указанном диапазоне магнитного поля пылевая плазма легко формировалась и была устойчивой. Вертикальный баланс действующих на частицу сил осуществляется электростатической силой, силой тяжести и силой ионного увлечения. Зависимость угловой скорости от магнитной индукции оказалась линейной, что по направлению и тенденции указывает на действие магнитного поля через силу ионного увлечения [14]. При наличии осевого и радиального градиентов плотности плазмы и электронной температуры мог бы работать альтернативный механизм вращения, связанный с вихревыми потоками электронов в магнитном поле [15–17], вызывающий вращение в обратном направлении, но он не проявился. Отклонение от линейной зависимости не просматривается, в частности, в области инверсии скорости в условиях тлеющего разряда (в поле около  $0.005 \text{ T}$ ) [1,2].



**Рис. 3.** Зависимость горизонтального межчастичного расстояния от магнитной индукции. Условия те же, что для рис. 1.

Количественная интерпретация основана на предположении о стационарном вращении пылевых частиц под действием силы ионного увлечения и силы торможения Эпштейна разреженным газом (когда длина свободного пробега частицы газа больше размера пылевой частицы). Угловая скорость вращения пылевой частицы определяется выражением, которое линейно зависит от магнитного поля:

$$\omega = \frac{en_i v_{Tn} v_{Ti} \tau_i U_{ir} B \left\{ 1 + \frac{z\tau}{2} + \frac{z^2 \tau^2}{4} \Pi \right\}}{\xi p r_d}, \quad (1)$$

где  $\tau = \frac{T_e}{T_i}$ ,  $z = \frac{z_d e^2}{a T_e}$  — безразмерный заряд частицы,  $z_d$  — ее зарядовое число,  $a$  — радиус частицы,  $U_{ir}$  — скорость радиального потока ионов,  $\tau_i$  — время межчастичных столкновений,  $v_{Ti}$  и  $v_{Tn}$  — тепловая скорость ионов и атомов газа,  $\Pi$  — модифицированный кулоновский логарифм, проинтегрированный с функцией распределения ионов по скоростям,  $p$  — давление газа,  $r_d$  — расстояние от частицы до оси трубки,  $\xi$  — коэффициент аккомодации (порядка единицы). Остальные обозначения стандартные. Для количественной оценки использованы литературные данные [11,18,19]. Оценка  $\omega = 0.8 \text{ rad/s}$  для условий вблизи диффузной границы плазмоида хорошо согласуется с экспериментом (рис. 2).

В использованном диапазоне магнитной индукции радиальное межчастичное расстояние не изменяется. Полученные межчастичные расстояния (рис. 3) показывают, что плотность пылевой компоненты в горизонтальном сечении соизмерима с плотностью в условиях тлеющего разряда при минимальной вкладываемой мощности.

Таким образом, в работе впервые создана пылевая плазма в условиях ВЧИ-разряда в магнитном поле. Измерена угловая скорость вращения пылевой структуры в диапазоне магнитного поля до 0.02 Т. Вектор угловой скорости структуры направлен противоположно вектору магнитной индукции. Определена зависимость среднего радиального межчастичного расстояния от магнитного поля. Направление вращения, пропорциональность магнитной индукции и величина угловой скорости указыва-

ют на действие механизма ионного увлечения пылевых частиц в условиях эксперимента.

Полученные результаты позволяют использовать пылевую ловушку в ВЧИ-разряде для изучения объемной пылевой плазмы в сильном магнитном поле.

### Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 22-12-00002).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] E.S. Dzlieva, L.G. Dyachkov, L.A. Novikov, S.I. Pavlov, V.Yu. Karasev, *Europhys. Lett.*, **123** (1), 15001 (2018). DOI: 10.1209/0295-5075/123/15001
- [2] E.S. Dzlieva, L.A. Novikov, S.I. Pavlov, V.Yu. Karasev, L.G. Dyachkov, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29** (8), 085020 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/aba8cd
- [3] E.S. Dzlieva, L.A. Novikov, S.I. Pavlov, V.Yu. Karasev, L.G. Dyachkov, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28** (8), 085020 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab36ac
- [4] M. Schwabe, U. Konopka, P. Bandyopadhyay, G.E. Morfill, *Phys. Rev. Lett.*, **106** (21), 215004 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.215004
- [5] E. Thomas, Jr., B. Lynch, U. Konopka, R.L. Merlino, M. Rosenberg, *Phys. Plasmas*, **22** (3), 030701 (2015). DOI: 10.1063/1.4914089
- [6] M. Choudhary, R. Bergert, S. Mitich, M.H. Thoma, *Phys. Plasmas*, **27** (6), 063701 (2020). DOI: 10.1063/5.0004842
- [7] A. Melzer, H. Krüger, S. Schütt, M. Mulsow, *Phys. Plasmas*, **26** (9), 093702 (2019). DOI: 10.1063/1.5116523
- [8] A.B. Недоспасов, УФН, **116** (8), 643 (1975). DOI: 10.3367/UFNr.0116.197508e.0643 [A.V. Nedospasov, *Sov. Phys. Usp.*, **18** (8), 588 (1975). DOI: 10.1070/PU1975v018n08ABEH004914].
- [9] А.Р. Абдирахманов, В.Ю. Карасев, Е.С. Дзлиева, С.И. Павлов, Л.А. Новиков, М.К. Досболаев, С.К. Коданова, Т.С. Рамазанов, ТВТ, **59** (5), 657 (2021). DOI: 10.31857/S0040364421040013 [A.R. Abdirakhmanov, V.Yu. Karasev, E.S. Dzlieva, S.I. Pavlov, L.A. Novikov, M.K. Dosbolayev, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, *High Temp.*, **60** (Suppl. 2), S153 (2022). DOI: 10.1134/S0018151X21040015].
- [10] Ю.В. Герасимов, А.Н. Нефедов, В.А. Синельщиков, В.Е. Фортвов, *Письма в ЖТФ*, **24** (19), 62 (1998). [Yu.V. Gerasimov, A.P. Nefedov, V.A. Sinel'shchikov, V.E. Fortov, *Tech. Phys. Lett.*, **24** (10), 774 (1998). DOI: 10.1134/1.1262263].
- [11] V.E. Fortov, O.F. Petrov, A.D. Usachev, A.V. Zobnin, *Phys. Rev. E*, **70** (4), 046415 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevE.70.046415
- [12] В.Ю. Карасев, Е.С. Дзлиева, С.И. Павлов, Л.А. Новиков, И.Ч. Машек, *ЖТФ*, **89** (1), 50 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46961.71-18 [V.Yu. Karasev, E.S. Dzlieva, S.I. Pavlov, L.A. Novikov, I.Ch. Mashek, *Tech. Phys.*, **64** (1), 42 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219010158].

- [13] В.Ю. Карасев, Е.С. Дзлиева, С.И. Павлов, Л.А. Новиков, А.И. Эйхвальд, И.Ч. Машек, *ЖТФ*, **90** (2), 202 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48809.269-19 [V.Yu. Karasev, E.S. Dzljeva, S.I. Pavlov, L.A. Novikov, A.I. Eikhval'd, I.Ch. Mashek, *Tech. Phys.*, **65** (2), 190 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220020085].
- [14] *Комплексная и пылевая плазма*, под ред. В.Е. Фортова, Г.Е. Морфила (Физматлит, М., 2012). [*Complex and dusty plasmas: from laboratory to space*, ed. by V.E. Fortov, G.E. Morfill (Taylor & Francis Group, N.Y., 2010)].
- [15] Л.Д. Цендин, *ЖТФ*, **40**, 1600 (1970). [L.D. Tsendin, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **15**, 1245 (1971)].
- [16] A.V. Nedospasov, *Phys. Rev. E*, **79** (3), 036401 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevE.79.036401
- [17] A.V. Nedospasov, *Europhys. Lett.*, **103** (2), 25001 (2013). DOI: 10.1209/0295-5075/103/25001
- [18] Ю.П. Райзер, *Физика газового разряда* (Наука, М., 1992), с. 379–387. [Yu.P. Raizer, *Gas discharge physics* (Springer-Verlag, Berlin, 1991)].
- [19] А.А. Кудрявцев, А.С. Смирнов, Л.Д. Цендин, *Физика тлеющего разряда* (Лань, СПб., 2010), с. 385.