

УДК 537.525: 537.636

БЫСТРОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЫЛЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ОБЛАСТИ СУЖЕНИЯ КАНАЛА ТОКА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ~ 1 Тл

© 2024 г. Л. Г. Дьячков^{1,*}, Е. С. Дзлиева², Л. А. Новиков², С. И. Павлов², В. Ю. Карасев²

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

*E-mail: dyachk@mail.ru

Поступила в редакцию 22.04.2024 г.

После доработки 15.05.2024 г.

Принята к публикации 09.07.2024 г.

Рассмотрены механизмы вращения пылевых частиц в магнитном поле внутри вставки, определяющей положение первой стоячей страты в тлеющем разряде. Показано, что в полях, превышающих 0.5 Тл, существенное значение наряду с ионным увлечением может приобретать увлечение пылевых частиц нейтральным газом. Учет этого механизма приводит к заметному увеличению скорости вращения и хорошему согласию с экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S0040364424030014

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что в магнитном поле пылевые частицы, зависающие в электрических разрядах, начинают вращаться [1–5]. Это наблюдалось как в ВЧ-разрядах [6–8], так и в стратифицированных тлеющих разрядах постоянного тока [1, 2, 9], в которых ловушка для пылевых частиц возникает в голове страты, где градиент электрического поля ∇E направлен вниз. В этих ловушках при магнитных полях $B \lesssim 0.01$ Тл вращение происходит против часовой стрелки, если смотреть в направлении магнитного поля, которое в экспериментах такого типа направлено вверх. Угловая скорость вращения при этом полагается отрицательной ($\Omega < 0$), а основным механизмом вращения является ионное увлечение [10, 11]. С увеличением магнитного поля происходит смена основного механизма вращения. При $B \approx 0.1$ Тл основным становится увлечение нейтральным газом, вращение которого происходит под действием силы Ампера, связанной с вихревыми токами в стратах [12–14]. В голове страты радиальная компонента вихревого тока направлена от стенки разрядной трубки к ее оси, при этом газ, а вместе с ним и пылевые частицы вращаются по часовой стрелке ($\Omega > 0$). С увеличением магнитного поля этот механизм вращения становится преобладающим и происхо-

дит инверсия вращения. Вращение газа, увлекающее пылевые частицы, было зарегистрировано также в магнетронном разряде [15, 16]. Магнитное поле является одним из возможных факторов, влияющих на движение пылевых частиц как в условиях эксперимента, так и в природе [10]. В частности, магнитное поле существенно влияет на поведение пылевых структур в приповерхностных областях Луны и других объектов Солнечной системы [17, 18].

В тлеющем разряде ловушка для пылевых частиц может возникать не только в голове страты. Она может формироваться вдоль по потоку электронов после существенной неоднородности разряда [19]. В [20] пылевая структура формировалась в области сильно неоднородного магнитного поля. В [21] протяженная пылевая плазма исследовалась над нижней стенкой трубки вблизи поворота канала тока. В [22] пылевая кольцеобразная структура возникала над специальной диэлектрической вставкой, сужающей канал тока. В [23] показано, что ловушка для пылевых частиц может сформироваться также в области сужения канала тока внутри вставки, несколько ниже ее самого узкого места. Такая вставка применяется, как правило, для формирования системы стоячих страт. Появление ловушки в области сужения канала тока, несколько ниже него, по-видимому, связано с двойным

электрическим слоем в этой части положительного столба [24].

В [25] наблюдалось вращение пылевой структуры внутри вставки при $B \leq 1$ Тл и была предложена модель для объяснения такого вращения влиянием только ионного увлечения. Результаты расчета по этой модели хорошо согласуются с экспериментальными данными в магнитных полях $B \leq 0.5$ Тл. При этом расчет дает снижение скорости вращения по абсолютной величине с увеличением магнитного поля при всех значениях $B > 0.1$ Тл, а в эксперименте уже при $B > 0.6$ Тл такого снижения не наблюдается. При $B > 0.7$ Тл результаты расчета по модели выходят за пределы погрешности экспериментальных данных. В [25] сделано предположение, что внутри конической вставки канал тока может расширяться, и появляется горизонтальная составляющая тока, но никаких оценок с учетом этого сделано не было.

В данном сообщении предлагается простая модель на основе такого предположения и выполнен соответствующий расчет скорости вращения пылевых частиц для условий [25].

РАСЧЕТ

Схема эксперимента по исследованию вращения пылевой структуры внутри диэлектрической вставки под действием магнитного поля [25] показана на рис. 1. Вертикально расположенная разрядная трубка радиусом $R = 0.95$ см наполнена неоном под давлением 0.4 Торр, радиус верхнего края вставки $R_0 = 0.25$ см, разрядный ток $I = 1.5$ мА. В эксперименте использовались кварцевые частицы с характерным размером 2 мкм. Подробное описание эксперимента и расчета дано в [25]. В расчете предполагалось для простоты, что ток в области сужения канала внутри вставки распределен равномерно по его сечению. В расчетной модели данной работы это предположение сохраняется, а также допускается, что внутри конической вставки ниже ее самого узкого места канал тока расширяется, т.е. появляется горизонтальная составляющая тока, направленная от оси разряда к стенке. В этом случае можно провести аналогию с действием вихревого тока в страте [12–14], однако направление горизонтальной составляющей тока внутри вставки противоположно направлению горизонтальной составляющей вихревого тока в страте. Соответственно, и направление вращения, вызванного этой составляющей тока, противоположно, в этом случае оба механизма – ионное увлечение и увлечение нейтральным газом – действуют в одном направлении и $\Omega < 0$, инверсии вращения не происходит.

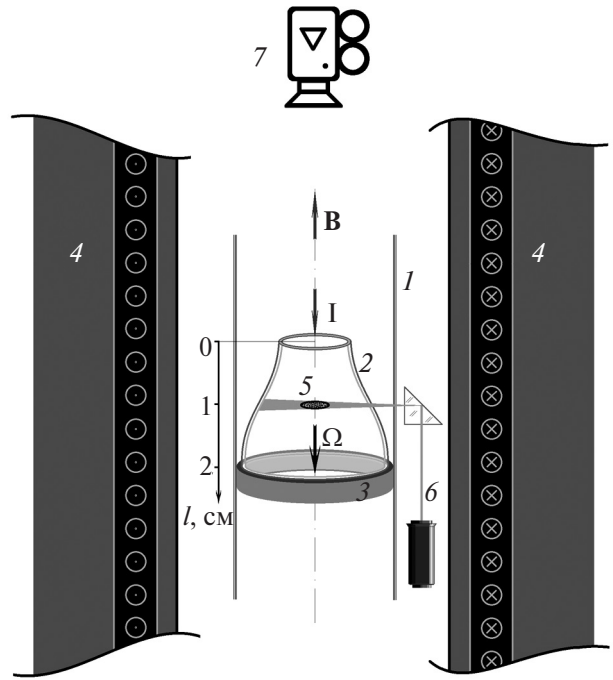


Рис. 1. Схема эксперимента в [25]: 1 – разрядная трубка, 2 – вставка, 3 – тефлоновая опора для вставки, 4 – соленоид в криостате, 5 – пылевая структура, 6 – лазерная подсветка, 7 – видеокамера.

Для угловой скорости вращения пылевой частицы в результате ионного увлечения в [25] получена формула

$$\Omega_1 = - \frac{2.9 n_i}{R_x^2 n_a} \frac{T_i z^2 \tau^3 v_{ea} \omega_{iB}}{m_i v_{ea} (v_{ia}^2 + 4\omega_{iB}^2) + 2m_e v_{ia} (v_{ea}^2 + \omega_{eB}^2)}, \quad (1)$$

где n_i , m_i , T_i – концентрация, масса и температура (в энергетических единицах) ионов; n_a – концентрация атомов; $z = |Z_d| e^2 / (a T_e)$ – безразмерный заряд пылевой частицы (eZ_d и a – ее заряд и радиус); $\tau = T_e / T_i$; v_{ea} , v_{ia} – частоты столкновений электронов и ионов с атомами; ω_{eB} , ω_{iB} – циклотронные частоты электронов и ионов. В разрядной трубке фиксированного сечения R_x – ее радиус. В области сужения канала тока хорошее согласие с экспериментом, как показано в [25], дает выбор этой величины меньше, чем радиус трубки R , но больше радиуса отверстия R_0 во вставке, $R_0 < R_x < R$. По-видимому, это можно объяснить тем, что на оси трубки, где расположена пылевая структура, сужение канала тока менее заметно, чем в периферийных слоях.

Для определения составляющей скорости вращения в результате увлечения нейтральным газом воспользуемся уравнением из работ Недоспасова [13, 14], которое применялось для учета влияния вихревых токов в страте на вращение пылевых частиц:

$$\eta \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial r^2} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0. \quad (2)$$

Здесь η – вязкость газа; \mathbf{u} – азимутальная скорость вращения газа на расстоянии r от оси разряда; \mathbf{j} – плотность тока, которая в данном случае имеет радиальную составляющую j_r . Положение вставки и пылевой структуры в ней в эксперименте [25] соответствовало середине соленоида, где магнитное поле однородно и имеет только продольную компоненту. В результате уравнение (2) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 u_\phi}{\partial r^2} = \frac{B j_r}{\eta}. \quad (3)$$

В условиях работы [25] длина свободного пробега атома $\sim 10^{-2}$ см, поэтому уравнения (2) и (3) вполне применимы.

Рассмотрим простейшую расчетную модель (рис. 2). Штриховыми линиями показано предполагаемое расширение канала тока внутри вставки, в пределах которого ток равномерно распределяется по сечению канала. Пусть пылевая частица находится на глубине l от горла вставки и на расстоянии r от ее оси, а радиус равномерно расширяющегося канала на этой глубине есть R_1 . Тогда линия тока, отстоящая на глубине l от оси на расстояние r , проходит через горло вставки на расстоянии $r_0 = r R_0 / R_1$ от оси. На глубине l плотность тока $j(l) = I / \pi R_1^2$, а ее радиальная составляющая на расстоянии r от оси разряда

$$j_r(l, r) = \frac{I}{\pi R_1^2} \frac{r - r_0}{\sqrt{l^2 + (r - r_0)^2}} \cong \frac{I r (R_1 - R_0)}{\pi R_1^3 l}, \quad (4)$$

где учтено, что $r - r_0 \ll l$. Подставляя (4) в (3), после интегрирования находим

$$u_\phi(r) = \frac{B I (R_1 - R_0)}{\pi \eta R_1^3 l} \left(\frac{r^3}{6} + A r + C \right).$$

Из граничных условий $u_\phi(0) = u_\phi(R_1) = 0$ определяем константы интегрирования $C = 0$ и $A = -R_1^2 / 6$. В результате для угловой скорости вращения газа, а вместе с ним и пылевых частиц получаем

$$\Omega_2 = \frac{u_\phi(r)}{r} = -\frac{B I (R_1 - R_0) (R_1^2 - r^2)}{6 \pi \eta R_1^3 l}. \quad (5)$$

В (5) присутствует параметр R_1 – радиус расширяющегося канала тока внутри вставки на расстоянии l от ее верхнего края (на уровне положения пылевой структуры), который пока не задан. Его значение выберем, исходя из условия наилучшего согласия результатов расчета полной скорости вращения пылевой структуры

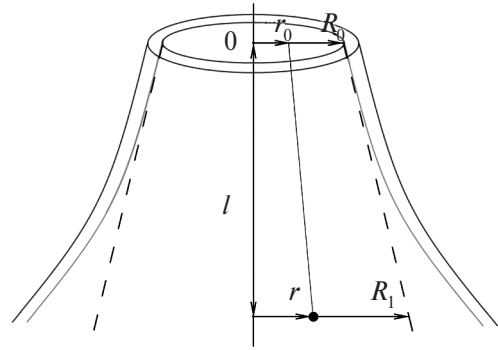


Рис. 2. К пояснению метода расчета.

$$\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 \quad (6)$$

с экспериментальными данными для всех значений магнитного поля $0 < B \leq 1$ Тл.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные и результаты расчета из [25] по формуле (1) – кривые 1–3 и данной работы по (5) и (6) – кривые 4, 5. Кривая 1 соответствует выбору в (1) $R_x = (R_0 + R) / 2 = 0.6$, кривая 2 – положению пылевой структуры вблизи верхнего края вставки на расстоянии от него $l = 0.2$ см, где сужение канала тока на оси разряда менее заметно, поэтому взято несколько большее значение $R_x = 0.7$ см. Кривая 3 соответствует перемещению пылевой структуры вниз, $l = 1$ см. Здесь сужение канала тока вблизи оси, где находится пылевая структура, становится более заметным, и, соответственно, взято $R_x = 0.5$ см.

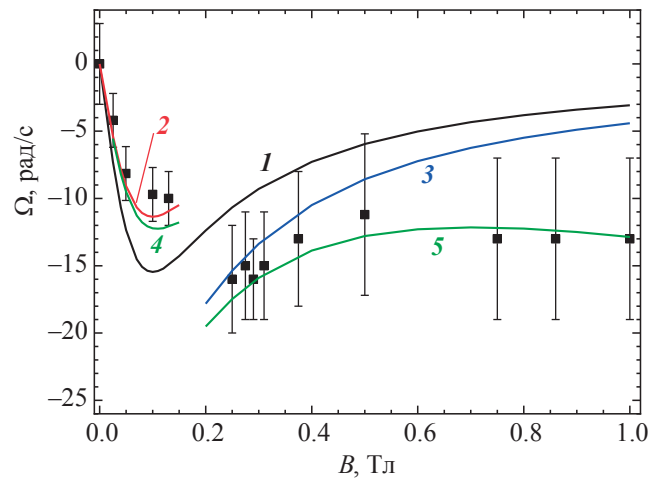


Рис. 3. Зависимость угловой скорости вращения пылевой структуры внутри вставки от магнитного поля при $p = 0.4$ Торр, $I = 1.5$ мА; маркеры – экспериментальные данные; 1–3 – учет только ионного увлечения, [25]; 4, 5 – учет также увлечения нейтральным газом (данная работа); 2, 4 – $l = 0.2$ см; 3, 5 – 1 см.

Для кривых 1–3 из [25] характерно увеличение скорости вращения по абсолютной величине с ростом магнитного поля при его малых значениях $B < 0.1$ Тл, когда частоты столкновений в (1) преобладают над циклотронными частотами. С увеличением B соотношение между этими частотами меняется и скорость вращения начинает уменьшаться. Но в эксперименте такого уменьшения скорости вращения при $B > 0.5$ Тл не наблюдается. Для объяснения этого предполагается некоторое расширение канала тока и предложена простая модель для его учета с одним свободным параметром R_1 . На рис. 3 кривые 4 и 5 показывают результаты расчета по (5) и (6) при $R_1 = R_0 + 0.01l$. Таким образом, достаточно предположить увеличение радиуса канала тока всего на 0.01 см (или 4%) на длине 1 см, чтобы объяснить результаты эксперимента [25] при $B > 0.5$ Тл. При относительно малых полях ($B \sim 0.1$ Тл) такое уширение канала тока внутри вставки приводит к малозаметным результатам – кривые 2 и 4 близки друг к другу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В [25] измерена скорость вращения пылевой структуры внутри вставки, сужающей канал тока, под действием магнитного поля $B \leq 1$ Тл и предложена теоретическая модель, объясняющая такое вращение влиянием ионного увлечения. В полях $B \leq 0.5$ Тл было получено хорошее согласие теории с результатами измерений, однако уже при $B > 0.7$ Тл результаты расчета по модели выходили за пределы экспериментальной погрешности. В данном сообщении на основе предположения о некотором расширении канала тока внутри вставки предложена простая расчетная модель, учитывающая увлечение пылевых частиц нейтральным газом. Показано, что предположение об уширении канала тока на 4% на длине 1 см внутри вставки приводит к хорошему согласию результатов теоретической модели с экспериментальными данными во всем диапазоне значений магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 22-12-00002) в части эксперимента и Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-00270-24-00) в части теории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ishihara O., Kamimura T., Hirose K.I., Sato N.* Rotation of a Two-dimensional Coulomb Cluster in a Magnetic Field // *Phys. Rev. E.* 2002. V. 66. 046406.
2. *Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ivanov A.Y., Eikhval'd A.I.* Rotational Motion of Dusty Structures in Glow Discharge in Longitudinal Magnetic Field // *Phys. Rev. E.* 2006. V. 74. 066403.
3. *Nedospasov A.V.* Motion of Plasma-dust Structures and Gas in a Magnetic Field // *Phys. Rev. E.* 2009. V. 79. 036401.
4. *Carstensen J., Greiner F., Hou L.J., Maurer H., Piel A.* Effect of Neutral Gas Motion on the Rotation of Dust Clusters in an Axial Magnetic Field // *Phys. Plasmas.* 2009. V. 16. 013702.
5. Комплексная и пылевая плазма: из лаборатории в космос / Под ред. Фортова В.Е., Морфила Г. М.: Физматлит, 2012. 444 с.
6. *Schwabe M., Konopka U., Bandyopadhyay P., Morfill G.E.* Pattern Formation in a Complex Plasma in High Magnetic Fields // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106. 215004.
7. *Thomas E. Jr., Lynch B., Konopka U., Merlino R.L., Rosenberg M.* Observations of Imposed Ordered Structures in a Dusty Plasma at High Magnetic Field // *Phys. Plasmas.* 2015. V. 22. 030701.
8. *Choudhary M., Bergert R., Mitic S., Thoma M.H.* Three-dimensional Dusty Plasma in a Strong Magnetic Field: Observation of Rotating Dust Tori // *Phys. Plasmas.* 2020. V. 27. 063701.
9. *Vasiliev M.M., Dyachkov L.G., Antipov S.N., Huijink R., Petrov O.F., Fortov V.E.* Dynamics of Dust Structures in a DC Discharge under Action of Axial Magnetic Field // *EPL.* 2011. V. 93. 15001.
10. *Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е.* Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 384 с.
11. *Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф.* Пылевая плазма // *УФН.* 2004. Т. 174. № 5. С. 495.
12. *Цендин Л.Д.* Ионизационные и дрейфово-температурные волны в средах с горячими электронами // *ЖТФ.* 1970. Т. 40. № 8. С. 1600.
13. *Nedospasov A.V.* Gas Rotation in a Stratified Positive Column of Discharge in Longitudinal Magnetic Field // *EPL.* 2013. V. 103. 25001.
14. *Недоспасов А.В.* Вращение газа в разрядах в продольном магнитном поле // *УФН.* 2015. Т. 185. № 6. С. 615.
15. *Паль А.Ф., Рябинкин А.Н., Серов А.О., Филиппов А.В.* Вращение нейтрального газа в магнетронном разряде // *ЖЭТФ.* 2012. Т. 141. № 3. С. 608.
16. *Паль А.Ф., Рябинкин А.Н., Серов А.О., Филиппов А.В.* Вращение нейтрального газа в магнетронном разряде // *Письма в ЖТФ.* 2014. Т. 40. № 24. С. 112.
17. *Popel S.I., Golub' A.P., Kassem A.I., Zelenyi L.M.* Dust Dynamics in the Lunar Dusty Plasmas: Effects of Magnetic Fields and Dust Charge Variations // *Phys. Plasmas.* 2022. V. 29. 013701.
18. *Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M.* Dusty Plasmas above the Sunlit Surface of Mercury Variations // *Phys. Plasmas.* 2023. V. 30. 043701.
19. *Клярфельд Б.Н.* Образование страт в газовом разряде // *ЖЭТФ.* 1952. Т. 22. С. 66.
20. *Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I.* Dusty Plasma in Inhomogeneous Magnetic

- Fields in a Stratified Glow Discharge // *Molecules*. 2021. V. 26. P. 3788.
21. Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю. Свойства плазменно-пылевых образований, сформированных в тлеющем разряде над нижней стенкой разрядной камеры // *Физика плазмы*. 2012. Т. 38. № 7. С. 591.
22. Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И. Исследование магнитомеханического эффекта в газовом разряде с помощью пылевых частиц // *Опт. и спектр.* 2002. Т. 92. № 6. С. 1018.
23. Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Павлов С.И. Динамика плазменно-пылевых структур в ловушке в области сужения канала тока в магнитном поле // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42. № 2. С. 142.
24. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 543 с.
25. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu. Fast Rotation of Dust Particle Structures in DC Glow Discharge in a Strong Magnetic Field // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2019. V. 28. 085020.