

УДК 533.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ИОННОГО УВЛЕЧЕНИЯ

© 2022 г. Л. Г. Дьячков¹ *, Е. С. Дзлиева², Л. А. Новиков², С. И. Павлов², В. Ю. Карасев²¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: dyachk@mail.ru

Поступило в редакцию 05.10.2022 г.

После доработки 10.11.2022 г.

Принято к публикации 06.12.2022 г.

В данной работе рассмотрены механизмы вращения пылевых частиц в стратифицированном тлеющем разряде при наложении на него продольного магнитного поля. Показано, что даже в магнитных полях $B > 1$ Тл влияние ионного увлечения не является пренебрежимо малым и его учет может приводить к более хорошему согласию с экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S0040364422060096

ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния магнитного поля на пылевые структуры в плазме ведутся уже более 20 лет [1–5]. В частности, такое воздействие представляет интерес как способ управления пылевыми частицами в различных технологических процессах. Большинство работ выполнено в ВЧ-разрядах [3–7], но исследования пылевых структур также проводились и в стратифицированных разрядах постоянного тока [8–11]. Стратификация разряда постоянного тока необходима, так как устойчивое положение отрицательно заряженных пылевых частиц возможно только в неоднородном электрическом поле с направленным вниз градиентом ∇E . Одним из наиболее интересных эффектов воздействия магнитного поля на пылевые структуры является их вращение с изменением направления вращения при увеличении поля [8]. При малых полях ($B \sim 0.01$ Тл) вращение происходит против часовой стрелки, если смотреть в направлении магнитного поля, в этом случае угловая скорость вращения полагается отрицательной, $\Omega < 0$. Механизмом такого вращения является ионное увлечение [12]. При увеличении магнитной индукции происходит инверсия вращения, что связано с преобладанием другого механизма вращения. В стратифицированном разряде постоянного тока под действием вихревых токов [13] в магнитном поле происходит вращение нейтрального газа [14, 15]. По длине страты это вращение меняет направление, но в голове страты (его нижней светящейся части), в области устойчивого равновесия пылевых частиц, оно происходит по часовой стрелке, $\Omega > 0$. В полях $B \gtrsim 0.1$ Тл вращение пылевых

частиц, увлекаемых газом, наблюдается в этом же направлении.

В работе [16] измерена скорость вращения пылевых частиц в полях 1.1–2.2 Тл и предложена аналитическая модель для описания такого вращения. Получено удовлетворительное согласие расчета по этой модели с экспериментальными данными. При этом влияние ионного увлечения не учитывалось, так как в данных условиях оно имеет второстепенное значение и его вклад, казалось, может быть порядка погрешности экспериментальных данных или даже меньше. Кроме того, предполагалось, что вклад этого механизма будет на уровне вариации результатов расчета вклада основного в данных условиях механизма — увлечения нейтральным газом, поскольку ряд параметров, используемых в модели, известен приближенно. Тем не менее влияние ионного увлечения на скорость вращения пылевой структуры даже при больших магнитных полях может представлять определенный интерес, и в данном кратком сообщении приводятся результаты расчета с учетом этого влияния.

РАСЧЕТ С УЧЕТОМ ИОННОГО УВЛЕЧЕНИЯ

Эксперимент в [16] проводился в неоне при давлении $p = 0.66$ Торр в разрядной трубке радиусом $R = 0.95$ см, расположенной вертикально, при токе $I = 1.5$ мА. Магнитное поле создавалось сверхпроводящим односекционным соленоидом длиной 20 см, находящимся в криостате. Магнитное поле было направлено вверх, а электрическое поле — вниз, чтобы удерживать отрицательно заряженные пылевые частицы. Схема эксперимен-

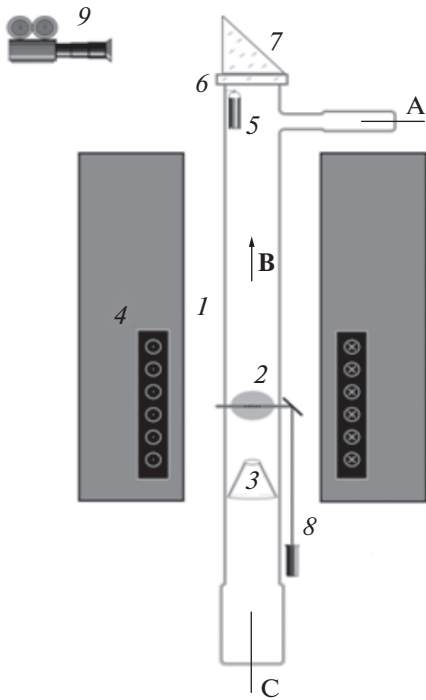


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – разрядная трубка, 2 – пылевая структура в страте, 3 – диэлектрическая вставка, 4 – сверхпроводящий соленоид, 5 – контейнер с пылевыми частицами, 6 – торцевое окно, 7 – поворотная призма, 8 – система лазерного освещения, 9 – видеокамера, А – анод, С – катод.

та приведена на рис. 1. Наблюдения проводились в голове страты, расположенной в центре соленоида, где магнитное поле достаточно однородно. Для создания пылевой структуры применялись полидисперсные кварцевые частицы. Характерный размер частиц в структуре около 4 мкм.

Предложенная в [16] расчетная аналитическая модель опирается на результаты Недоспасова [15] относительно вихревых токов в стратах и использует простые аналитические распределения параметров физических величин вдоль страты. Предполагалось радиальное распределение ионов (электронов) согласно модели Шоттки в виде профиля Бесселя $n_i(r) = n_{i0}J_0(\alpha r/R)$, где n_{i0} – плотность ионов на оси разряда, $\alpha = 2.405$ – первый корень функции Бесселя $J_0(x)$. Стратификация разряда связана, как известно, с нелокальностью процессов в плазме разряда [17], в первую очередь процессов ионизации. В данной работе, как и в [16], рассматривается неоднородность продольного распределения параметров плазмы в стратах без учета нелокальности породивших ее процессов. Распределения плотности ионов (электронов) и температуры электронов вдоль оси страт аппроксимировались соотношениями

$$n_{i0}(z) = n_{i00}[1 - k_n \cos(2\pi z/L)], \quad (1)$$

$$T_e(z) = T_{e0}[1 + k_T \cos(2\pi z/L)], \quad (2)$$

где L – длина страты, z – аксиальная координата пылевой структуры (или ее горизонтального сечения) в страте. Согласно результатам численных расчетов, в рамках самосогласованной модели стратифицированных разрядов [18] параметры k_n в (1) и k_T в (2) должны быть около 0.5. Пылевая структура в [16] имеет небольшие размеры и расположена в приосевой области, поэтому в расчетах можно использовать параметры, соответствующие оси разряда, например, $n_{i0}(z)$. Среднее значение концентрации ионов (электронов) n_{i00} вдоль страты оценивается по разрядному току [16]:

$$n_{i00} = \frac{\alpha n_a \sigma_{ea} I \sqrt{m_e T_{e0}}}{2\pi J_1(\alpha) R^2 e^2 E_0}, \quad (3)$$

где σ_{ea} – газокинетическое сечение рассеяния электрона на атоме неона, E_0 – среднее продольное электрическое поле. Распределение продольного электрического поля вдоль страты задается по [19]:

$$E(z) = \gamma E_0[1 + k_E \exp(\beta \cos(2\pi z/L))],$$

где значения параметров $\beta = 3$, $k_E = 0.5$, $\gamma = 0.29$ выбраны с учетом соответствия с распределением поля в близких экспериментальных условиях.

Результаты расчета угловой скорости пылевой структуры вследствие увлечения нейтральным газом [16] без учета ионного увлечения показаны на рис. 2 штриховыми линиями. Красная кривая соответствует значениям $k_T = k_n = 0.5$, она проходит несколько выше экспериментальных данных. Поэтому данные параметры были уменьшены (в допустимых пределах) до значений $k_T = k_n = 0.4$ (синяя штриховая кривая), в результате согласие с экспериментом улучшилось. Очевидно, что простая расчетная модель, предложенная в [16], не может воспроизвести отклонение экспериментальных данных от плавной зависимости, связанное, возможно, со случайными нерегулярными процессами в разрядной трубке. На рис. 2 показана также зависимость длины страты L от магнитного поля. Зависимость L от k_T и k_n очень слабая, две кривые, соответствующие значениям этих параметров 0.4 и 0.5, практически сливаются.

Ионное увлечение пылевых частиц в полях $B > 1$ Тл, как отмечено во Введении, имеет второстепенное значение, но, тем не менее, его вклад в угловую скорость вращения представляет определенный интерес. Этот вклад имеет отрицательное значение и может быть рассчитан по формуле из [20]

$$\Omega_{id} \cong - \frac{2.9 n_{i0}(z)}{R^2 n_a} \times \frac{T_i z_d^2(z) \tau^3(z) \nu_{ea} \omega_{iB}}{m_i \nu_{ea} (\nu_{ia}^2 + 4\omega_{iB}^2) + 2m_e \nu_{ia} (\nu_{ea}^2 + \omega_{eB}^2)}, \quad (4)$$

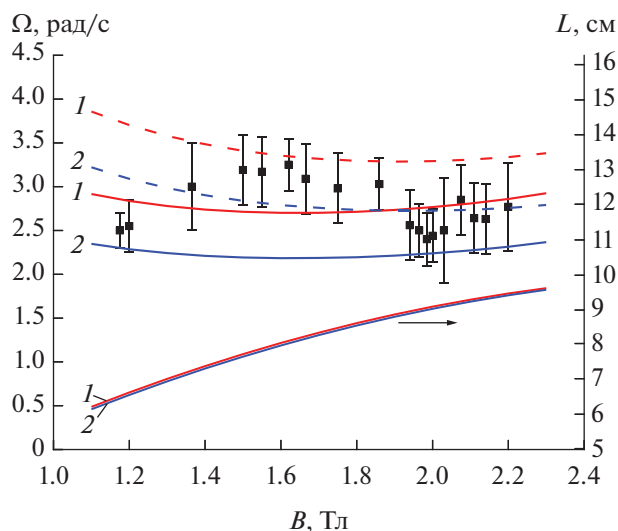


Рис. 2. Зависимость угловой скорости пылевой структуры Ω в страте тлеющего разряда и длины страты L от магнитного поля в неоне при $p = 0.66$ Торр и $I = 1.5$ мА: символы – экспериментальные данные; кривые – расчет с учетом (сплошные) и без учета (штриховые) ионного увлечения при $k_T = k_n = 0.5$ (1) и $k_T = k_n = 0.4$ (2).

которая применима и в полях $B > 1$ Тл. Здесь n_a – концентрация атомов, T_i – температура ионов, $z_d(z) = |Z_d(z)|e^2/aT_e(z)$ – безразмерный заряд пылевой частицы (eZ_d – ее заряд, a – радиус), $\tau(z) = T_e(z)/T_i$ – отношение температур электронов и ионов, $m_{i(e)}$ – масса иона (электрона), $\nu_{i(e)a}$ – частота столкновений ионов (электронов) с атомами, $\omega_{i(e)B}$ – циклотронная частота ионов (электронов).

Важными величинами, влияющими на скорость вращения пылевой структуры как в результате увлечения нейтральным газом, так и ионами, являются длина страты L (ее зависимость от магнитного поля) и координата z , определяющая положение пылевой структуры в страте. Их определение рассматривается в [16] с учетом того, что страта в результате ее удлинения в магнитном поле [17] может частично оказаться за пределами соленоида и тогда ее длину следует ограничивать. Положение пылевой структуры в страте, определяемое ее продольной координатой z , находится из баланса основных сил, действующих на пылевые частицы в вертикальном направлении: электростатической, гравитационной и ионного увлечения. В экспериментальных условиях [16] для диапазона магнитных полей 1.1–1.2 Тл получено $z/L = 0.11$ –0.12. Соответствующие значения $n_{i0}(z)$ используются при расчете составляющей скорости вращения за счет ионного увлечения по (4).

В условиях эксперимента [16] $T_i \approx 300$ К, $T_{e0} \approx 10^2 T_i$, $n_a = 2.12 \times 10^{16}$ см $^{-3}$, $Z_d = -1.3 \times 10^4 e$, $\sigma_{ea} =$

$= 1.8 \times 10^{-15}$ см 2 . По формуле (3) получаем $n_{i0} = 6.6 \times 10^8$ см $^{-3}$. Сплошные кривые на рис. 2 соответствуют результатам расчета с учетом вклада ионного увлечения (4). Роль этого механизма второстепенна, однако даже при $B > 1$ Тл он влияет на скорость вращения пылевых частиц. С его учетом расчет при $k_T = k_e = 0.5$ приводит к лучшему согласию с экспериментом, чем при $k_T = k_e = 0.4$; нет необходимости уменьшать эти параметры, хотя это не принципиально. Более важным является то, что даже при полях $B > 1$ Тл вклад этого механизма не становится пренебрежимо малым по сравнению с увлечением нейтральным газом. Кроме того, учет ионного увлечения несколько изменяет наклон теоретической кривой, что, по мнению авторов, улучшает ее согласие с экспериментом в среднем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В [16] измерена скорость вращения пылевых частиц в стратифицированном тлеющем разряде постоянного тока под действием магнитного поля $B = 1.1$ –2.2 Тл и предложена аналитическая модель для расчета этой скорости в результате увлечения пылевых частиц нейтральным газом. Этот механизм вращения является основным в сильных магнитных полях, а увлечение ионами, которое играет главную роль в слабых полях ($B \sim 10^{-2}$ Тл) и приводит к вращению в противоположном направлении, не учитывалось. В данном сообщении выполнен расчет вклада этого второстепенного механизма для условий [16] и показано, что он не является пренебрежимо малым и составляет около 20% от вклада основного механизма. Однако следует заметить, что неопределенность в значении вклада увлечения нейтральным газом, рассчитанного по аналитической модели, составляет, по-видимому, близкую к этому значению величину, так как ряд параметров, необходимых для расчета по модели, известен приближенно.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00002) в части эксперимента и Министерства науки и высшего образования (соглашение № 075-01056-22-00) в теоретической части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексная и пылевая плазма: из лаборатории в космос / Под ред. Фортова В., Морфила Г. М.: Физматлит, 2012. 444 с.
2. *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.
3. *Thomas E., Jr., Merlino R.L., Rosenberg M.* Magnetized Dusty Plasmas: The Next Frontier for Complex Plasma Research // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2012. V. 54. 124034.

4. *Melzer A., Kruger H., Schutt S., Mulsow M.* Finite Dust Clusters under Strong Magnetic Fields // *Phys. Plasmas*. 2019. V. 26. 093702.
5. *Choudhary M., Bergert R., Moritz S., Mitich S., Thoma M.H.* Rotational Properties of Annulus Dusty Plasma in a Strong Magnetic Field // *Contrib. Plasma Phys.* 2021. V. 61. № 1. e202000110.
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. *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.
9. *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.
10. *Vasiliev M.M., D'yachkov 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.
11. *Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu.* Complex Plasma in Glow Discharge in a Strong Magnetic Field // *EPL*. 2018. V. 123. 15001.
12. *Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е.* Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 384 с.
13. *Цендин Л.Д.* Ионизационные и дрейфово-температурные волны в средах с горячими электронами // *ЖТФ*. 1970. Т. 40. № 8. С. 1600.
14. *Nedospasov A.V.* Motion of Plasma-dust Structures and Gas in a Magnetic Field // *Phys. Rev. E*. 2009. V. 79. 036401.
15. *Nedospasov A.V.* Gas Rotation in a Stratified Positive Column of Discharge in Longitudinal Magnetic Field // *EPL*. 2013. V. 103. 25001.
16. *Dzlieva E.S., D'yachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu.* Complex Plasma in a Stratified Glow Discharge in a Strong Magnetic Field // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29. 085020.
17. *Недоспасов А.В.* Страты // *УФН*. 1968. Т. 94. № 3. С. 439.
18. *Сухинин Г.И., Федосеев А.В.* Самосогласованная кинетическая модель эффекта стратификации разрядов низкого давления в инертных газах // *ТВТ*. 2006. Т. 44. № 2. С. 165.
19. *Golubovskii Yu., Karasev V., Kartasheva A.* Dust Particle Charging in a Stratified Glow Discharge Considering Nonlocal Electron Kinetics // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2017. V. 26. 115003.
20. *Dzlieva E.S., D'yachkov 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.