

УДК 537.525

Л. А. Новиков, В.Ю. Карасев, Е.С. Дзलिएва, М. А.Ермоленко, С. И. Павлов, М. М. Макар

*Институт физики Санкт Петербургского государственного университета
198504, Санкт-Петербург, Ульяновская ул., 1, E-mail: plasmadust@yandex.ru*

СОБСТВЕННОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

АННОТАЦИЯ

Пылевая частица в низкотемпературной плазме обладает собственным вращением под действием некомпенсированных плазменных потоков, поступающих на ее поверхность. В обсуждаемых исследованиях наложенное магнитное поле применялось для управления плазменными потоками. В работе использовались как сферические, так и отличные от сферической формы частицы. Исследован ряд эффектов, в частности пороговый эффект возникновения вращения под действием магнитного поля, явление гистерезиса в зависимости частоты собственного вращения частицы от величины магнитного поля. Обнаруженным эффектам предложена качественная интерпретация.

КОМПЛЕКСНАЯ ПЛАЗМА, ПЫЛЕВЫЕ ВОЛЧКИ, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ВВЕДЕНИЕ

Комплексная плазма представляет собой пример самоорганизованной открытой системы, обладающей рядом уникальных термодинамических, механических и электрических свойств [1]. После обнаружения у пылевых частиц собственного вращения [2,3], стало понятно, что пылевая подсистема комплексной плазмы обладает и магнитными свойствами. Пылевые гранулы могут иметь на своей поверхности электрический заряд до 10^6 элементарных и вращаться с частотой до 10^3 Гц, т. е. обладать магнитными моментами величиной до 10^5 магнетонов Бора [4]. Несмотря на небольшой суммарный магнитный момент пылевого образования [5], возникает ряд новых свойств, связанных с ориентацией и выстраиванием пылевых гранул в системе и во внешних полях [6,7].

Изучение магнитных свойств комплексной плазмы также необходимо для полного понимания поведения пылевых структур во внешнем магнитном поле [8-11], которое в последние годы стало существенным методом воздействия и управления пылевыми структурами [1,12]. Так магнитное поле может изменять механическое состояние пылевых образований, изменять порядок в системе [10,13,14], влиять на условия левитации частиц [15], оно применяется для возбуждения ударных и нелинейных волн в пылевых структурах [16,17].

Пылевая гранула может обладать магнитным моментом в двух случаях. Первый случай связан с использованием частиц из материала с постоянной намагниченностью. С такими частицами был выполнен ряд работ, направленных на изучение условий левитации и процесса агломерации [15,18,19]. Во втором случае магнитный момент генерируется поверхностным петлевым током вращающейся заряженной частицы. Именно этот случай рассматривается в настоящей работе. В виду того, что пылинки обладают собственным

вращением даже в отсутствии внешнего магнитного поля [2,3,4], было решено исследовать динамику вращения пылевых частиц, величину и направление их магнитных моментов при наложении магнитного поля. Магнитные свойства пылевой плазмы, в зависимости от величины магнитной индукции, определяются различными факторами. В слабом магнитном поле замагничена только электронная компонента плазмы, основные исследования до сих пор проводились в этом диапазоне. В средних полях 0.1-0.3 Тл замагничены ионы, и только в сильных полях 2-3 Тл замагничены сами пылевые гранулы, однако экспериментальные исследования в этом диапазоне поля практически отсутствуют.

В настоящей работе использовалась установка, с помощью которой можно проводить наблюдения отдельных частиц в диапазоне магнитной индукции до 250 Гс, что соответствует слабому магнитному полю (замагничены только электроны). Основные результаты, полученные в работе – регистрация количественного влияния магнитного поля на собственное вращение пылевых частиц сферической и асимметричной формы.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При планировании эксперимента мы исходили из результатов работ [2,3] и задачи регистрации динамики вращения пылевых частиц в магнитном поле. В [2] использовалось единственное значение поля 1000 Гс, и производилось сравнение числа вращающихся частиц и их скорости со случаем отсутствия поля, причем и количество наблюдаемых частиц, и сами конкретные частицы были различными. В настоящей работе для проведения эксперимента был выбран способ постепенного изменения магнитного поля с возможностью перемены его направления и непрерывное наблюдение за вращающимися частицами. С этой целью в пылевую ловушку каждый раз помещалась только одна пылевая частица, используемый для этого метод описан в [3].

Для детектирования вращения нужны пылевые частицы достаточно больших размеров. Использовались полидисперсные полые стеклянные микросферы плотностью 0.1-0.4 г/см³, при наблюдениях выбирались частицы размером от 10 мкм. Их удержание производилось в пылевой ловушке, формирующейся в головной части страты. Режим стоячих страт в тлеющем разряде осуществлялся при токе 1-4 мА, давлении несколько десятых Торр, в неоне и его смесях с водородом при нескольких соотношениях. Применялась разрядная камера, детально описанная в [3], и модернизированная в отношении применения магнитного поля, см. рис.1.

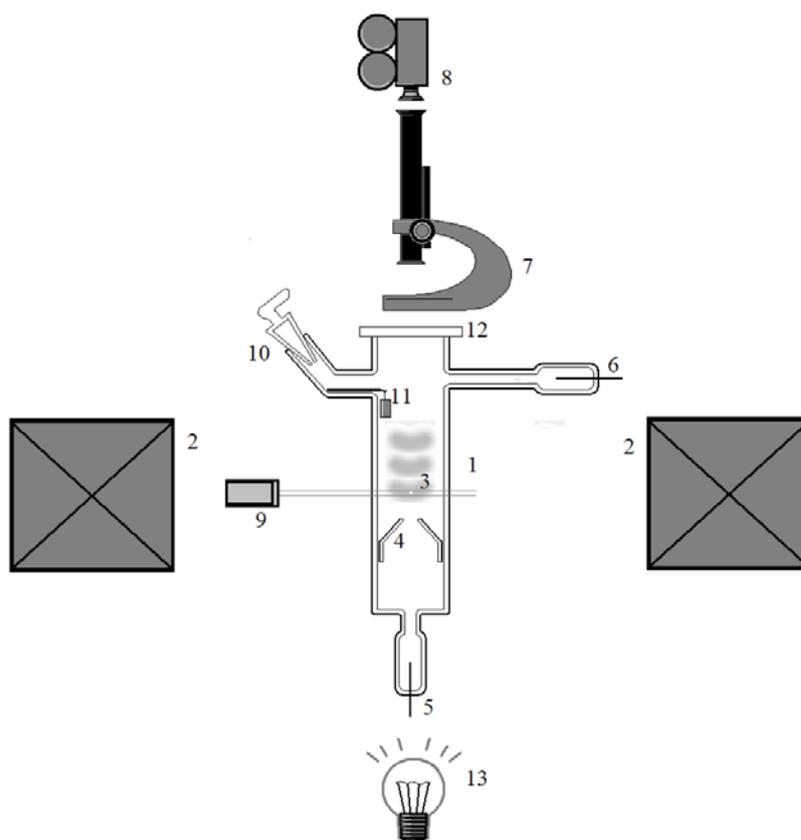


Рис. 1. Схема установки. 1- разрядная трубка, 2- магнитная катушка, 3 – пылевая частица в страте, 4 – разрядная диафрагма, 5 – катод, 6 – анод, 7 – оптическая система, 8- скоростная видеокамера, 9 – боковая подсветка лазером, 10 – вакуумный кран, 11 – контейнер с частицами, 12 - торцевое окно, 13 – нижняя подсветка.

Ее центральная часть (разрядная трубка) была ориентирована вертикально, соосно с направлением индукции магнитного поля, величина которой изменялась от 0 до 250 Гс в обе стороны. Пылевые частицы левитировали в двух первых стратах в вертикальной трубке, в зависимости от условий разряда и величины индукции магнитного поля, в 6-9 см от оптической системы, расположенной сверху. Оптическая система, сконструированная на основе микроскопа МБС-10, была не магнитной и позволяла получать изображение находящейся в разряде частицы с увеличением порядка 100. Для визуализации частиц применялась лазерная подсветка в горизонтальной плоскости (сбоку от направления наблюдения) с помощью лазерного модуля KLM-20 с шириной пучка от 3 мм, либо использовалось рассеянное излучение снизу (на просвет). Контроль настройки фокуса осуществлялся в один из окуляров микроскопа, второй был сопряжен с регистрирующей камерой. Использовался цифровой аппарат с полным мануальным управлением, а также скоростная видеокамера FastVideo-300.

Эксперимент проводился следующим образом. При выбранных условиях в отсутствие магнитного поля зажигался разряд, затем в него инжектировались частицы. При левитации в страте уединенной пылевой гранулы определялись ее размер и форма, производилась видеозапись ее движения. Последнее осуществлялось либо посредством скоростной видеосъемки, либо по методу координатной развертки. Метод развертки детально изложен в [3], в используемой системе он позволял регистрировать вращение с угловой скоростью до 12000 рад/с. Далее накладывалось магнитное поле, проводился контроль фокусировки частицы с последующей записью движения. Видеофайлы, сохраненные в формате avi, подвергались обработке программными средствами для определения величины и направления угловой скорости пылевой частицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

I *Эксперименты с частицами сферической формы.* Первоначально для наблюдений выбирались сферически симметричные частицы с минимальным количеством дефектов на поверхности, что определялось по интенсивности спекла рассеяния частиц при подсветке лазером. На нескольких десятках проведенных наблюдений было установлено, что у таких частиц угловая скорость вращения отсутствует, вращение появляется как пороговый эффект либо при наложении магнитного поля с индукцией порядка 100 Гс, либо при увеличении разрядного тока до 3 мА и более.

Большинство частиц сферической формы имеют поверхностные дефекты. С ними связано их собственное вращение в отсутствии магнитного поля [3,5,7]. Магнитное поле в диапазоне 100-200 Гс слабо влияет на это вращение. На рис.2. показана зависимость скорости вращения Ω_1 от магнитной индукции.

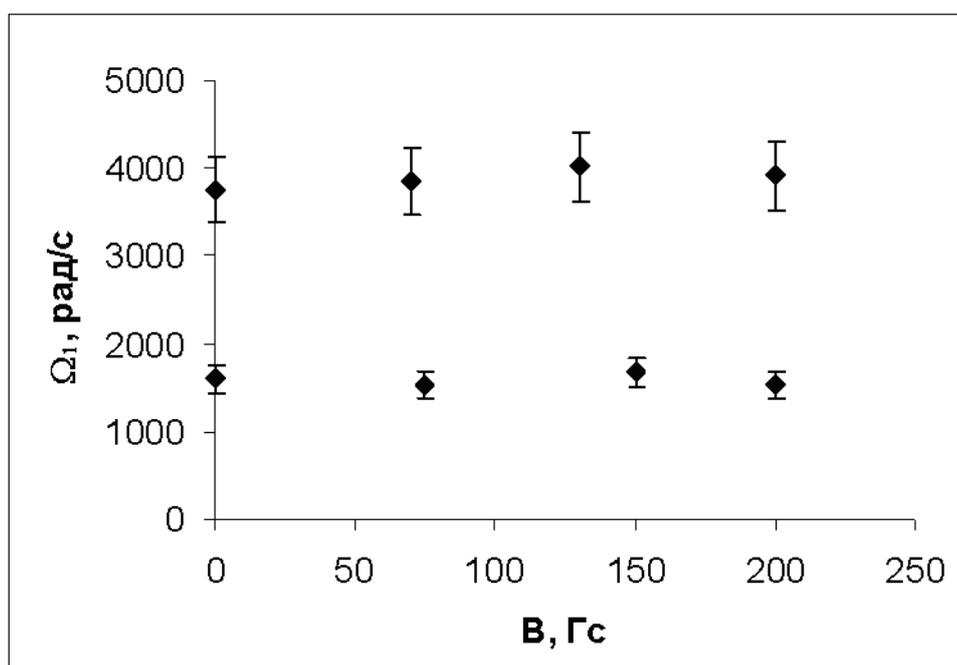


Рис. 2. Пример зависимости угловой скорости собственного вращения от магнитной индукции для двух частиц сферической формы размером 20 мкм. Условия: газ неон, давление 0,15 торр, ток 1,3 мА.

В отсутствие магнитного поля оси вращения сферических частиц ориентированы произвольно. В магнитном поле подавляющая часть частиц имеет угловую скорость, направленную против вектора индукции. Магнитные моменты раскручиваемых сферических частиц ориентируются вдоль вектора магнитной индукции.

II *Эксперименты с частицами несферической формы.* Существенное влияние магнитного поля на скорость вращения частиц удалось наблюдать следующим образом. В засыпном порошке присутствует некоторая доля дефектных частиц. Вероятно, это сросшиеся или деформированные в процессе изготовления частицы, а также их фрагменты. Выборка пылинок вытянутой асимметричной формы из таких дефектных сфер показала следующее. В разряде вытянутые частицы ориентируются и левитируют в горизонтальной плоскости. Вокруг осей их фигур существует быстрое вращение с частотой Ω_1 , с теми же свойствами, как и у сферических частиц, см. [3].

Помимо Ω_1 для таких частиц существует относительно медленное вращение Ω_2 , с которым сами оси фигур частиц поворачиваются вокруг вертикальной оси, рис.3.

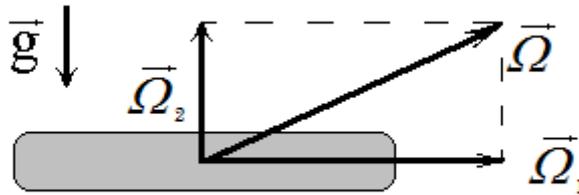


Рис. 3. Поясняющая схема вращения пылевой частицы вытянутой формы в отсутствие магнитного поля. Существует быстрое вращение вокруг оси фигуры частицы с угловой скоростью Ω_1 и относительно медленное вращение вокруг вертикальной оси с угловой скоростью Ω_2 .

Оно возникает в отсутствие магнитного поля, но количественно изменяется при его наложении.

На основании анализа поведения нескольких десятков частиц, отобранных из сотен наблюдений, обнаружено следующее. У частиц, обладающих существенно вытянутой геометрической формой, угловая скорость вращения Ω_2 вокруг вертикальной оси в отсутствие магнитного поля направлена против силы тяжести. Ее величина для наблюдаемых частиц порядка 100 рад/с. Наложение магнитного поля обоих направлений приводит к слабому изменению величины скорости, рис.4.

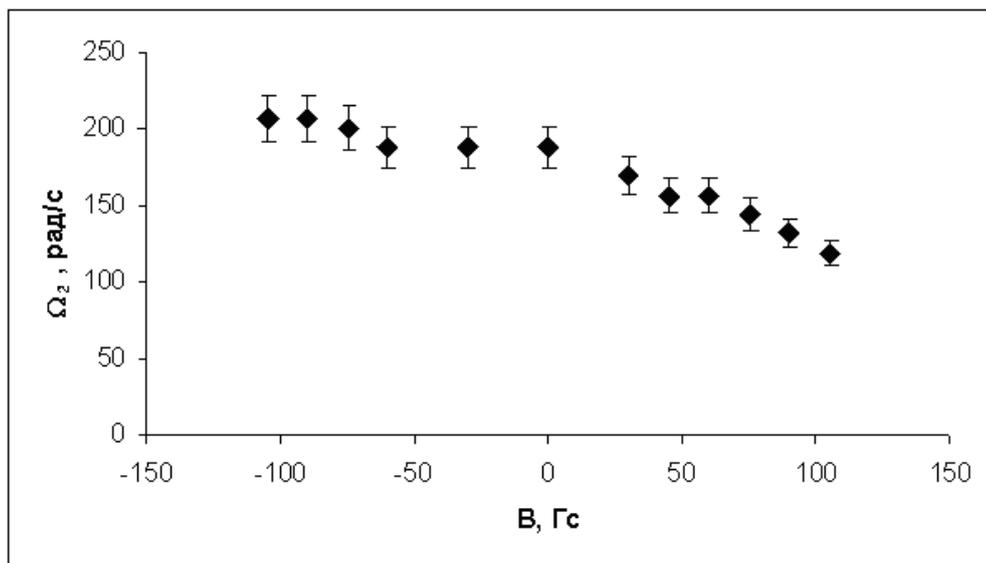


Рис. 4. Пример спадающей зависимости вертикальной составляющей угловой скорости собственного вращения асимметричной пылевой частицы. Условия: газ – смесь неона с водородом 2:1, давление 0,3 торр, ток 3,0 мА, частота съемки 150 Гц.

Для разных частиц наблюдается возрастающая, или спадающая зависимость от магнитной индукции фиксированного направления. При спадающей зависимости по мере увеличения индукции возможна остановка вращения Ω_2 с дальнейшей переменной его направления.

Для частиц, у которых величина вертикальной угловой скорости в магнитном поле достигает существенно больших значений, от 500 рад/с и выше, наблюдается немонотонное скачкообразное изменение зависимости. Пылевая частица переворачивается, вертикальная составляющая угловой скорости меняет знак без изменения величины. Характерный пример эффекта демонстрирует рис.5.

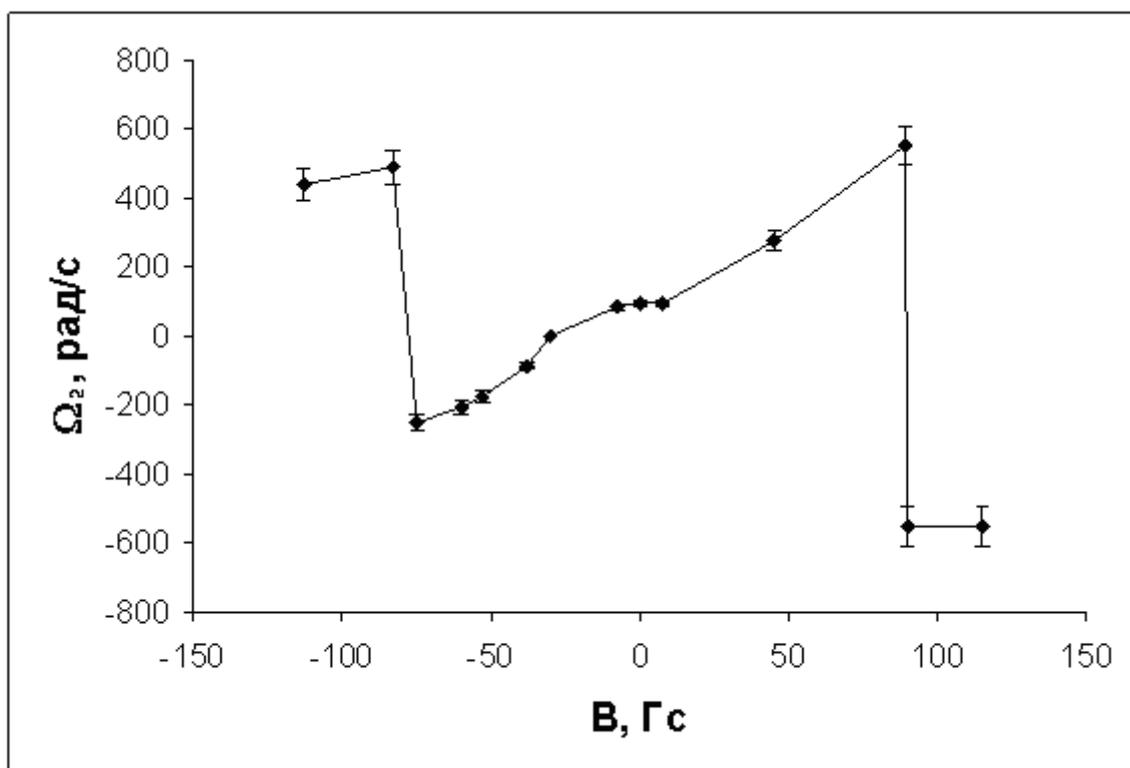


Рис. 5. Зависимость вертикальной составляющей угловой скорости собственного вращения асимметричной частицы в магнитном поле. Зависимость имеет гладкий участок и скачкообразные изменения, связанные с переворотами частицы. Условия: газ – смесь неона с водородом 2:1, давление 0,3 торр, ток 2,1 мА, частота съемки 1000 Гц.

Отметим, что скачок может происходить в обоих направлениях, частица может последовательно переворачиваться несколько раз, но скачок наблюдается только в момент изменения магнитного поля. При неизменных разрядных условиях, величине и направлении магнитной индукции, вертикальная угловая скорость каждой частицы остается неизменной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1 *Сферические частицы.* При наблюдении за частицами сферической формы было обнаружено два эффекта: возникновение вращательного движения в магнитном поле; изменение ориентации векторов угловых скоростей изначально вращающихся частиц, которые ориентируются против вектора магнитной индукции, т.е., наблюдается выстраивание магнитных моментов частиц по вектору магнитной индукции.

Причиной возникновения вращения в магнитном поле может быть азимутальная составляющая ионного увлечения, существующая благодаря непрерывному потоку плазменных частиц, идущему на поверхность пылевой гранулы в процессе поддержания ее заряда. Однако причина порогового характера возникновения вращения остается не ясной.

Сравнить наблюдаемое поведение частиц с имеющимися литературными моделями механизмов вращения в магнитном поле [20-22] пока не представляется возможным. В представленном эксперименте наблюдались уединенные частицы (в отличие от [20]), диэлектрические (в [21] рассмотрены проводящие), их положение было на оси симметрии разряда, где радиальное поле отсутствует (влияния скрещенных полей, рассмотренного в [22] нет). Возможно, будущие наблюдения в увеличенном диапазоне магнитного поля такое сравнение с моделями позволят выполнить.

4.2. *Несферические частицы.* Относительно асимметричных частиц можно сказать следующее. Причина быстрого вращения частиц вокруг осей их фигур (появляющаяся в отсутствие магнитного поля) та же, что и для сферических частиц [3]. В отсутствие

магнитного поля вращение самих осей фигур вокруг вертикальной оси имеет определенное направление – вектор угловой скорости Ω_2 всегда направлен вверх, рис.3. Причиной может быть прецессия быстро вращающейся частицы вокруг своей оси фигуры (в горизонтальной плоскости) под действием силы тяжести. В самом деле, вытянутая частица подобна симметричному волчку, опору которого обеспечивает электрическая сила, направленная вертикально вверх и являющаяся поверхностной силой. Для таких частиц центр инерции в силу дефектов будет смещен вдоль оси фигуры на величину l (в горизонтальной плоскости) сравнимую с толщиной стенки сферы, точка приложения силы тяжести не совпадает с точкой “опоры” волчка (точкой приложения электрической силы qE), рис.6.

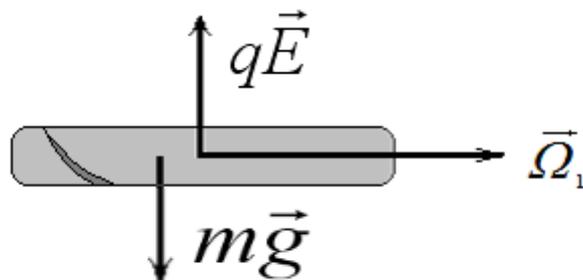


Рис. 6. Схематически показан дефект типа утолщения стенки частицы, и связанное с ним смещение центра инерции.

Как результат, возникает вынужденная прецессия под действием силы тяжести, угловая скорость которой направлена против силы тяжести [23]:

$$\Omega_2 = \frac{mgl}{I\Omega_1} \quad (1)$$

Согласно оценкам, угловая скорость прецессии может составлять сотню рад/с, что согласуется с наблюдениями.

При наложении магнитного поля с индукцией 100-150 Гс у частиц наблюдается либо уменьшение (рис.4), либо увеличение угловой скорости вращения частицы (рис.5 центральная часть графика). Можно предположить существование механизмов, сообщающих частицам вращательные моменты разных знаков. В зависимости от характеристик конкретной частицы (структуры дефектов, особенностей геометрии торцевых поверхностей) один из механизмов будет доминировать. Тогда для выбранной частицы характер зависимости - уменьшение или увеличение частоты - в магнитном поле остается неизменным, но для частиц с разной структурой дефектов, он будет различным.

Поскольку частота вынужденной прецессии Ω_2 обратно пропорциональна частоте вращения вокруг оси фигуры волчка Ω_1 , то изменение частоты Ω_1 вызывает соответствующее изменение частоты Ω_2 . Например, при величине Ω_1 в тысячу рад/с, ее изменение в магнитном поле 200 Гс в 5-10% (даже лежащее под погрешностью, аналогично изменению на рис.2), дает согласно формуле (1) изменение Ω_2 в 50-100 рад/с, что согласуется с наблюдениями - рис.4 и рис.5 центральная часть.

Особенности геометрии и левитации вытянутых пылевых частиц позволяют работать и другому механизму, связанному с передачей импульса пылевой частице потоком плазменных частиц на торцевые части вытянутой перпендикулярно магнитному полю пылинки. В пылевой плазме обычно преобладает импульс передаваемый потоком ионов, что при любом направлении магнитного поля приводит к эффекту только одного знака, соответствующему центральной части графика на рис.5. Точные численные оценки затруднительны, поскольку однозначно не определена величина потока на торцевые поверхности вытянутой частицы.

Заметим, что прецессия пылевого волчка, вызванная магнитным полем, является не наблюдаемой на фоне более быстрых движений. Ее частота определяется выражением

$$\Omega = \frac{qB}{2m}, \quad (2)$$

где q - заряд частицы, m – ее масса, что дает численное значение 10^{-3} рад/с.

Касательно немоного изменения частоты – скачков на зависимости на рис.5, можно предположить следующее. У частицы имеется два положения равновесия, когда проекция магнитного момента частицы направлена по и против индукции магнитного поля. При увеличении поля сама пылевая ловушка (стоячая страта) несколько смещается, оказывая на вращающийся пылевой волчок импульсное воздействие, что вызывает переворот. При таких толчках наблюдаются переходы в оба направления, от устойчивого равновесия к неустойчивому и обратно.

Таким образом, для наблюдаемых фрагментов динамики пылевых волчков в магнитном поле (постепенном и скачкообразном увеличении, или уменьшении угловой скорости вращения) можно предложить качественное объяснение и где возможно дать элементарную оценку. Каждая конкретная пылевая частица будет иметь свою определенную, не меняющуюся со временем, зависимость частоты собственного вращения от индукции магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе непосредственно на кинетическом уровне проведено прямое наблюдение динамики уединенных пылевых волчков, определяющих магнитные свойства комплексной плазмы. Для симметричных сферических частиц наблюдается возникновение вращения в слабом магнитном поле и изменение ориентации векторов угловой скорости. Оба явления показывают наличие у пылевой плазмы парамагнитных свойств.

Впервые обнаружено изменение вертикальной составляющей угловой скорости собственного вращения пылевых частиц в магнитном поле на примере частиц вытянутой асимметричной формы. Зарегистрировано линейное изменение угловой частоты вращения при относительно малых ее значениях, порядка 10-30 Гц, и скачкообразное изменение при больших значениях, порядка 70-100 Гц. Таким образом, показано, что поведение уединенного пылевого волчка в магнитном поле зависит от величины его магнитного момента.

Для обнаруженных эффектов предложена качественная интерпретация, включающая в рассмотрение прецессию пылевых волчков и передачу импульса плазменными частицами пылевой в плоскости, перпендикулярной направлению индукции магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортгов В.Е., Петров О.Ф., Молотков В.И., УФН 174, 495 (2004).
2. Sato N., AIP Conf. Proc. 799 97 (2005).
3. Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Eikhval'd A.I. et al., Phys. Rev. E 79, 026406 (2009).
4. Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И., Дзлиева Е.С., Вестник СПбГУ, Серия 4:Физика, химия, В.4 113 (2008).
5. Tsytovich N.V., Sato N., Morfill G.E., New Jour. Phys. 5, 43 (2003).
6. Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Golubev M.S. et al., DPA-2010, Odessa, 37 (2010).
7. Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Golubev M.S., Ivanov A.Yu.// Contr. Plasma Phys. 51, 509 (2011).
8. Sato N., Uchida G., Kaneko T., Phys. Plasmas 8, 1786 (2001).
9. Konopka U., Samsonov D., Ivlev A.V. et al., Phys. Rev. E 61, 1890 (2000).
10. Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ivanov A.Yu. et al., Phys. Rev. E 74, 066403 (2006).
11. D'yachkov L.G., Petrov O.F., Fortov V.E., Contr. Plasma Phys. 49, 134 (2009).
12. Complex and Dusty Plasmas ed. by Fortov V.E. and Morfill G.E., CRC Press, N.Y., 2010.

13. Дзлйева Е.С., Иванов А.Ю., Карасев В.Ю. и др., *Опт. и Спектр.* 98, 621 (2005).
14. Дзлйева Е.С., Иванов А.Ю., Карасев В.Ю. и др., *Опт. и Спектр.* 101, 882 (2006).
15. Samsonov D., Zhdanov S., Morfill G., *New Journ. Phys.* 5, 24 (2003).
16. Fortov V.E., Petrov O.F., Molotkov V.I. et al., *Phys. Rev. E* 71, 036413 (2005).
17. Fortov V.E., Petrov O.F., Molotkov V.I. et al., *Phys. Rev. E* 69, 016402 (2004).
18. Yaroshenko V.V., Morfill G.E., Samsonov D., Vladimirov S., *IEEE Translations on Plasma Science* 32, 675 (2004).
19. Yaroshenko V.V., Morfill G.E., Samsonov D., et al., *New Journ. of Phys.* 5, 18 (2003).
20. Ishihara O., Sato N., *IEEE Trans. Plasm. Scien.* 29, 179 (2001)
21. Krasheninnikov S.I., *Phys. Plasm.* 13, 114502 (2006).
22. Krasheninnikov S.I., Shevchenko V.I., Shukla P.K., *Phys. Lett. A* 361, 133 (2007).
23. Сивухин Д.В., *Общий курс физики Т.1*, Наука, Москва (1974).

L.A. Novikov, V.Yu. Karasev, S.I. Pavlov, E.S. Dzlieva, M.A. Ermolenko, M.M. Makar

*Institute of Physics, St. Petersburg State University, Russia, 198504, St. Petersburg,
Ulianovskaya 1, E-mail:plasmadust@yandex.ru*

SELF ROTATION OF DUST PARTICLES IN THE PLASMA FLOW IN A MAGNETIC FIELD

Dust particle in low-temperature plasma has its own rotation under the influence of uncompensated plasma streams flowing on its surface. In the paper a magnetic field is applied to control the plasma flows. We used both spherical and non-spherical particles. Several effects, in particular the threshold effect of a rotation under the influence of a magnetic field, the phenomenon of hysteresis in the dependence of the frequency of rotation of the particle from its own magnetic field was studied. Qualitative interpretation was given for observed effects.

COMPLEX PLASMA, DUST TOPS, MAGNETIC FIELD