

Краткие сообщения

03

О механизме собственного вращения пылевых частиц

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

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: plasmadust@yandex.ru, v.karasev@spbu.ru

(Поступило в Редакцию 28 июля 2015 г.)

Изучен вопрос о физической причине собственного вращения пылевых частиц. На основании анализа литературных данных и предыдущих работ авторов сделано предположение, что собственное вращение пылевых частиц вызвано азимутально-несимметричным потоком ионов на поверхность частицы, связанным с неравномерным распределением поверхностного заряда. Предположение согласуется с результатами экспериментов, в которых изменяется поток плазмы введением частиц в горизонтальной плоскости (горизонтальный кластер) и частиц, выстроенных вдоль тока разряда (вертикальный кластер); с наблюдением порога вращения от разрядного тока и от магнитного поля. Эксперименты выполнены с частицами сферической формы по методу координатной развертки. Полученные результаты позволяют развить модель раскручивания заряженных пылевых волчков для описания парамагнитных свойств комплексной плазмы.

Введение

Собственное вращение пылевых частиц было обнаружено экспериментально в [1]. Пылевые частицы, находящиеся в плазме в кластере из двух десятков частиц, регистрировались при высоком оптическом увеличении с помощью скоростного датчика движения. Было выяснено, что воздействие магнитного поля в 10^3 Г существенно увеличивает число вращающихся частиц. Авторы предположили в [2], что причиной собственного вращения может быть радиальная составляющая ионного потока, вызванная соседними частицами в продольном магнитном поле, а детектировать собственное вращение сферических частиц технически возможно из-за отклонения их формы от идеально сферической. Для вращения относительно малого числа частиц в отсутствие магнитного поля объяснение не приводилось.

В экспериментах с комплексной плазмой часто присутствуют „бракованные“ частицы, создавая нестабильности в плазменном кристалле и накладывая на регулярное движение структуры дополнительное нерегулярное [3]. В [4] мы исследовали собственное вращение уединенных сферических частиц в плазме. Благодаря предложенному методу координатной развертки удалось исследовать вращение сферических частиц, скоростная съемка диагностирует вращение не идеально сферических [1,2]. Было обнаружено, что в отсутствие магнитного поля сферические частицы также обладают собственным вращением, причем в условиях тлеющего разряда частота вращения гранул ν составляет до 1000 Hz, что на два порядка больше, чем наблюдалось в условиях эксперимента [1]. В таком случае наибольшая левитирующая пылевая гранула [4] (размером $a = 30 \mu\text{m}$, несущая на поверхности заряд q_d до 10^6 элементарных)

обладает магнитным моментом

$$\mu = \frac{2\pi q_d v a^2}{3}, \quad (1)$$

составляющим до 10^5 магнетонов Бора [5]. Заряженные пылевые волчки выстраиваются в магнитном поле, проявляя парамагнитные свойства [5,6]. Исследование магнитных свойств комплексной плазмы представляет собой новую актуальную задачу. Для ее решения необходимо определить физическую причину раскручивания частицы вокруг ее центра инерции, в первую очередь, определить роль дрейфового и диффузионного потоков в возникновении вращения. На это и направлены представленные в настоящей работе исследования.

Постановка эксперимента

Пылевая частица, находящаяся в плазме, получает импульс, энергию и электрический заряд от плазменных компонент. Поскольку во всех экспериментах по наблюдению собственного вращения использовался разряд постоянного тока, то в первую очередь в эксперименте необходимо выяснить роль направленного (дрейфового) потока плазмы, в магнитном поле и без него, а также роль потока плазмы, попадающего на пылевую частицу в процессе диффузии. Роль направленного потока была рассмотрена в нескольких работах. Во-первых, в [2], где соседние с пробной гранулой частицы влияли на формирование неоднородного направленного потока, что в магнитном поле сообщало пробной частице вращательный момент. Авторы оценили величину частоты вращения частицы порядка 10 Hz, что соответствует экспериментам [1] для вращающихся в кластере частиц,

но не согласуется с наличием не вращающихся. Вторых, в работе [7] была рассмотрена неоднородная зарядка сферической частицы в потоке ионов и электронов от анода и катода, создающая дипольный момент частицы, ориентированный в электрическом поле разряда в неустойчивом равновесии. Тогда пылевая частица, переходя к устойчивому равновесию, начинает вращаться. Выполненные автором численные оценки дают крайне высокие частоты вращения (порядка 1 МГц), что соответствует поведению космических пылевых туманностей [7], но не согласуется с лабораторными экспериментами [1–5]. Наконец в работе [8] рассмотрена сферическая гранула с неоднородной отражательной поверхностью в однородном потоке плазмы. Развита авторами модель показывает воздействие на частицу с конечным временем вращения и остановкой в новом положении равновесия. Согласно экспериментам [1–5], собственное вращение частиц происходит непрерывно и сколь угодно долго. Наши наблюдения показали [4], что вращаются уединенные частицы, а частота вращения существенно разнится от частицы к частице, даже у частиц одного размера. Это может указывать на индивидуальные особенности изготовления частиц — дефекты („бракованные“ частицы), а потоки плазмы на них не связаны с током самого разряда.

Для проверки сделанного предположения было принято решение провести эксперимент по наблюдению вращения частицы с формой, близкой к идеально сферической, в варьруемом потоке плазмы. Было решено рассматривать уединенную частицу и кластер, который будет влиять на поток плазмы на тестовую, в том числе в магнитном поле. Поскольку используются сферические частицы, то их регистрация производится не на скоростную камеру, а по методу координатной развертки.

Метод развертки заключается в следующем. Наблюдение собственного вращения производится на сферических прозрачных полых стеклянных частицах. Используются микросферы плотностью $0.4\text{--}0.9\text{ г/см}^3$ диаметром $10\text{--}120\text{ }\mu\text{м}$ с толщиной стенки порядка $1\text{--}2\text{ }\mu\text{м}$. На их поверхности существуют точечные дефекты, которые рассеивают проходящий сквозь частицу свет. Для создания комплексной плазмы применялась установка, аналогичная описанной в [9,10] с некоторой модернизацией. Частицы из контейнера, расположенного в верхней части разрядной камеры, вбрасывались в пылевую ловушку — стоячую страту в тлеющем разряде. Их подсветка осуществлялась сбоку лазерным излучением, а видеосъемка сверху видеокамерой с ПЗС матрицей в 1 мегапиксель и частотой до 240 кадров в секунду. Развертка изображения осуществлялась возвратно-поступательным движением системы оптической регистрации — жестко связанных немагнитной оптической головки МБС-10, обеспечивающей 100 кратное увеличение, и видеокамеры. Подсветка и развертка производились в горизонтальной плоскости во взаимно перпендикулярных направлениях.

Вращающаяся частица, находящаяся в пучке лазера, интенсивно рассеивает свет на дефектах поверхности, что разрешается с используемым оптическим увеличением системы. При поступательном движении системы регистрации вращательное и поступательное движения накладываются, образуя траекторию в форме циклоиды, параметры которой зависят от скорости и направления вращения, а также от направления движения системы [4]. Расшифровывая параметры циклоиды, получаем величину частоты вращения пылевой частицы.

Для эксперимента были выбраны следующие условия: газ неон, давление порядка 0.25 Па , ток разряда порядка $0.1\text{--}0.4\text{ мА}$, продольное магнитное поле до 250 Г . Левитирующие при этих условиях частицы имели диаметр $20\text{--}60\text{ }\mu\text{м}$. Первоначально в ловушку вводилась одна частица и измерялась частота ее вращения. Далее вводились дополнительные частицы, которые формировали вблизи исходной кластеры двух типов, преимущественно горизонтальный или преимущественно вертикальный, и измерение частоты вращения исходной частицы повторялось. Пример развертки уединенной частицы, фотография сформированного горизонтального кластера и повторной развертки представлены на рис. 1. Далее производилось определение частоты вращения в зависимости от изменяемых в эксперименте условий. Число модуляций света, рассеянного на дефекте, вращающемся вместе с частицей, соответствует частоте вращения частицы. Например, на рис. 1. на кадре зафиксированы 2.5 модуляции рассеянного света. При съемке с частотой 30 fps это соответствует частоте вращения 75 Hz .

Результаты, обсуждение и дополнительные эксперименты

Первым полученным результатом является отсутствие изменения частоты вращения пылевых частиц при создании дополнительных частиц в слое (горизонтальный кластер) и в вертикальной цепочке, где тестовая частица находилась внутри цепочки (вертикальный кластер). В эксперименте было создано порядка сотни кластеров, в которых было от 3 до 10 дополнительных частиц. Межчастичное расстояние варьировало от 0.3 до 1.0 мм в зависимости от геометрии и, вероятно, размеров дополнительных частиц. Возможностью вариации положения частицы в плазменном потоке разряда (что эквивалентно вариации потока) является ее смещение в горизонтальном сечении от центра на периферию разрядной трубки, где скорость потока возрастает из-за увеличения амбиполярного поля разряда. Смещение частицы в эксперименте производилось за счет силы термофореза [11], без изменения электрических характеристик разряда, на расстояние до половины радиуса трубки. Изменения частоты вращения частиц в пределах погрешности зарегистрированы не были. Из выполненных экспериментов можно заключить, что собственное вращение частиц не связано с протеканием через разряд

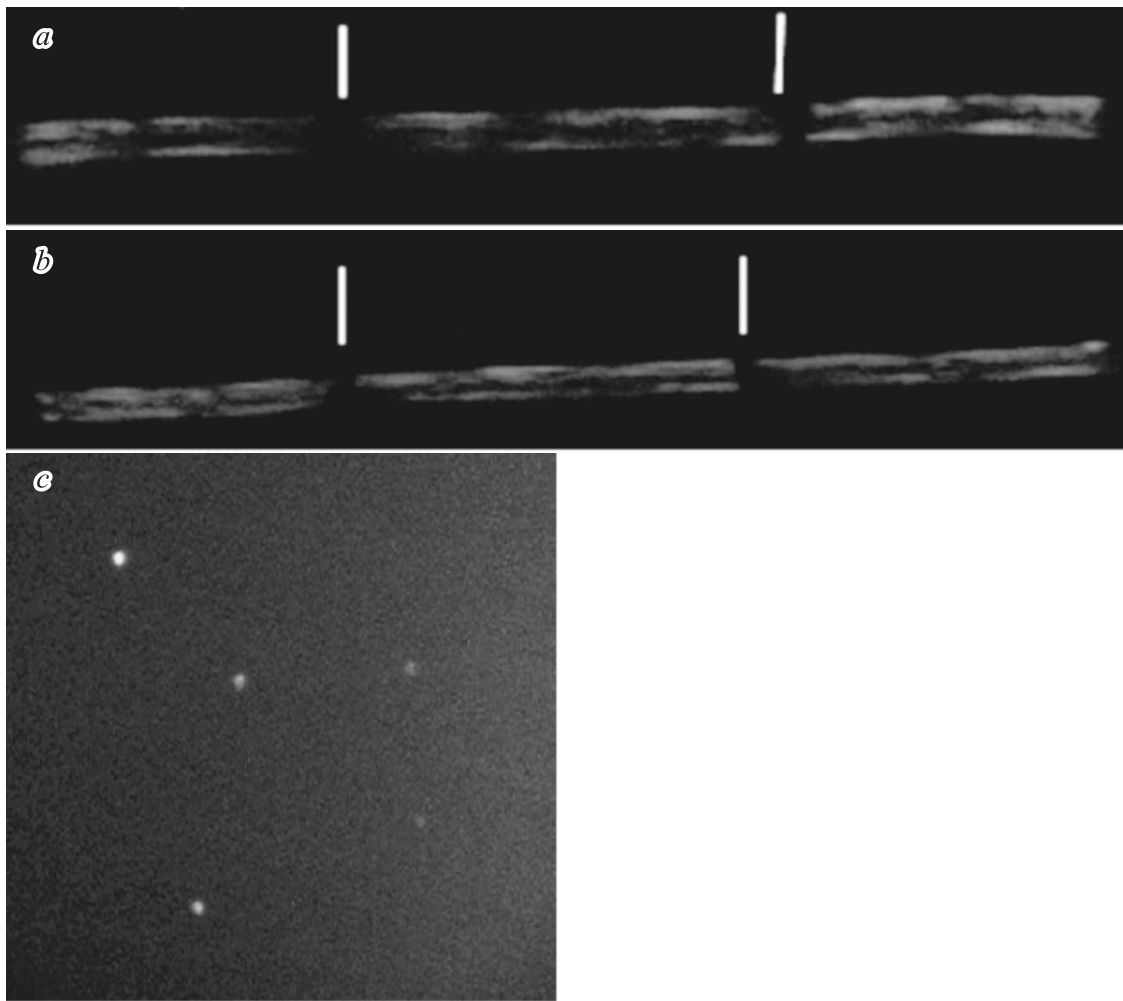


Рис. 1. Модуляция частицы, полученная по методу координатной развертки. *a* — развертка единственной частицы в ловушке. Условия: газ неон, давление 0.17 Па, ток разряда $i = 3.5$ мА, магнитное поле $B = 0$. На рисунке наложены три кадра, частица имеет $N = 2.5$ модуляций, частота ее вращения 75 Hz; *b* — та же частица, но в составе горизонтального кластера. На рисунке наложены три кадра, частица имеет $N = 2.5$ модуляций, частота вращения 75 Hz. Частота вращения не изменилась; *c* — общий вид горизонтального кластера после инъекции дополнительных частиц. Исходная изучаемая частица в центре кластера.

с пылевой частицей тока, или с радиальным амбиполярным потоком плазмы. В качестве причины вращения можно рассматривать естественный поток плазмы на поверхность частицы и асимметричную передачу импульса от плазменных частиц, в первую очередь от ионов, который идет непрерывно, поскольку частица находится под плавающим потенциалом подобно изолированному зонду.

Гипотеза о раскручивании пылевой частицы в процессе поддержания ее стационарного заряда содержится в [4,12], где полагалось отклонение формы частицы от идеально сферической. Оценки [12] дают частоту вращения порядка 5 Hz, что не согласуется с наблюдениями [4–6] и с настоящей работой. Уточним предположение относительно асимметричного потока плазмы на частицу (передачи момента импульса от ионов). Причина заключается не только в некой асимметрии поверх-

ности, но в асимметрии распределения поверхностного заряда частицы, что может быть связано с наличием нано- и микродефектов поверхности. Тогда можно ожидать появления азимутальной составляющей ионного потока, которая индивидуальна для каждой конкретной частицы и будет характеризоваться коэффициентом η , определяемым отношением азимутальной Γ_φ и радиальной Γ_r составляющих потока ионов $\eta = \frac{\Gamma_\varphi}{\Gamma_r}$, идущих на поверхность частицы из дебаевской сферы. Данное предположение может быть проверено в эксперименте с изменением концентрации плазмы. При изменении тока разряда меняется n_i , но не изменяется η , что будет приводить к линейной зависимости частоты вращения от разрядного тока, тангенс угла наклона зависимости для каждой частицы остается неизменным.

В дополнительном эксперименте наблюдалось вращение отдельных частиц при изменении разрядного тока.

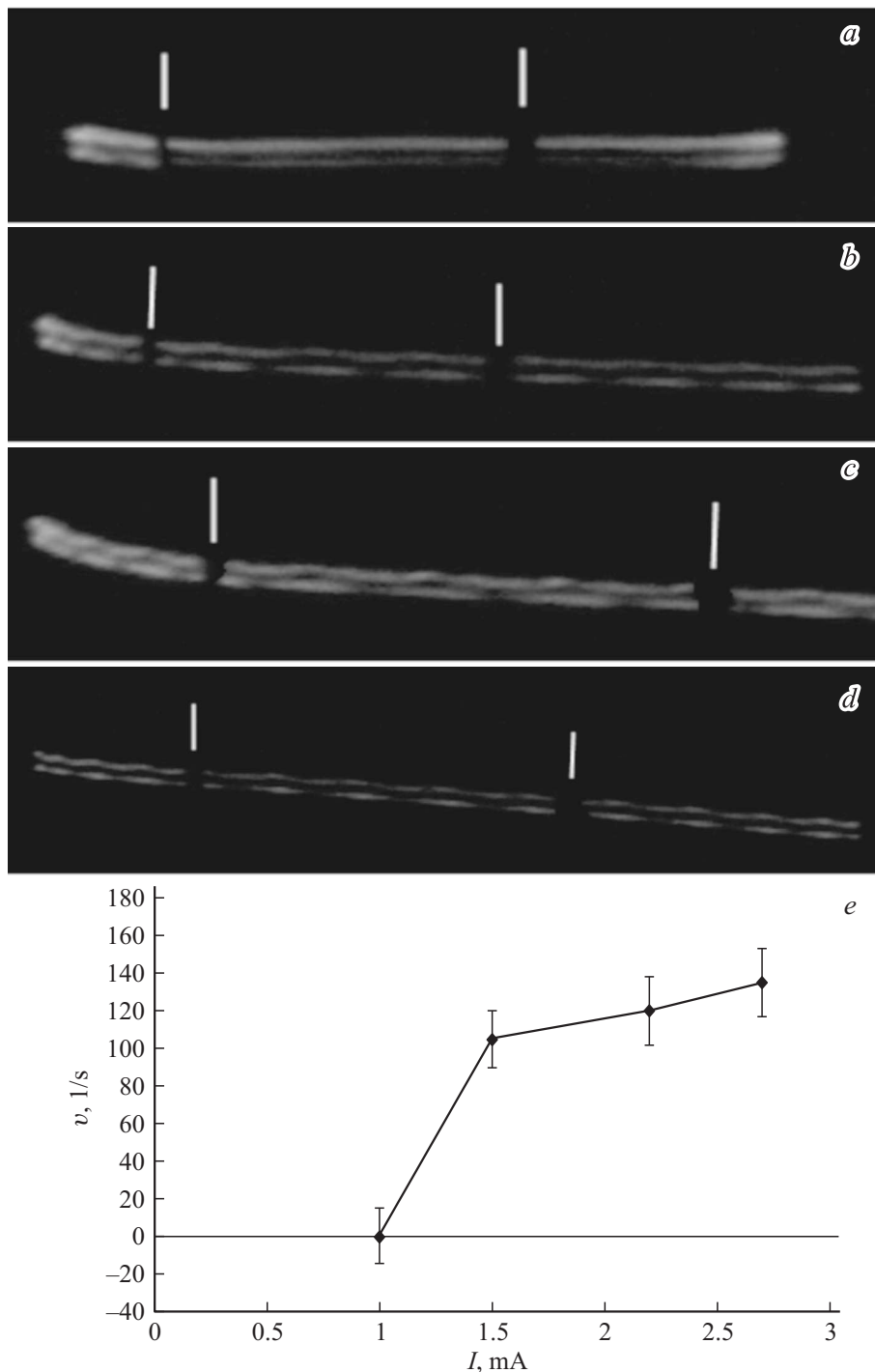


Рис. 2. Регистрация порогового эффекта раскручивания частицы в зависимости от разрядного тока. Три последовательных снимка координатной развертки частицы сферической формы при условиях: *a* — ток разряда $I = 1$ мА, давление $p = 0.7$ Па, газ неон. Модуляции не обнаруживаются $N = 0$; *b* — ток разряда $I = 1.5$ мА, давление $p = 70$ Па, газ неон. Модуляции появились (регистрация порогового эффекта вращения), $N = 3.5$, частота вращения 105 Hz; *c* — ток разряда $I = 2.2$ мА, давление $p = 70$ Па, газ неон. Модуляции регистрируются, их число $N = 4$, частота вращения 120 Hz; *d* — ток разряда $I = 2.74$ мА, давление $p = 70$ Па, газ неон. Модуляции регистрируются, их число $N = 4.5$, частота вращения 135 Hz; *e* — пороговый характер возникновения собственного вращения в зависимости от разрядного тока для сферической частицы, представленной на рис. *a-d*.

При малых токах до 1 мА частицы формы, близкой к идеально сферической, не вращались. Их вращение возникало как пороговый эффект при увеличении тока

примерно до 2 мА индивидуально для каждой частицы. Были произведены наблюдения порядка ста частиц, типичная зависимость показана на рис. 2. Пороговый эффект,

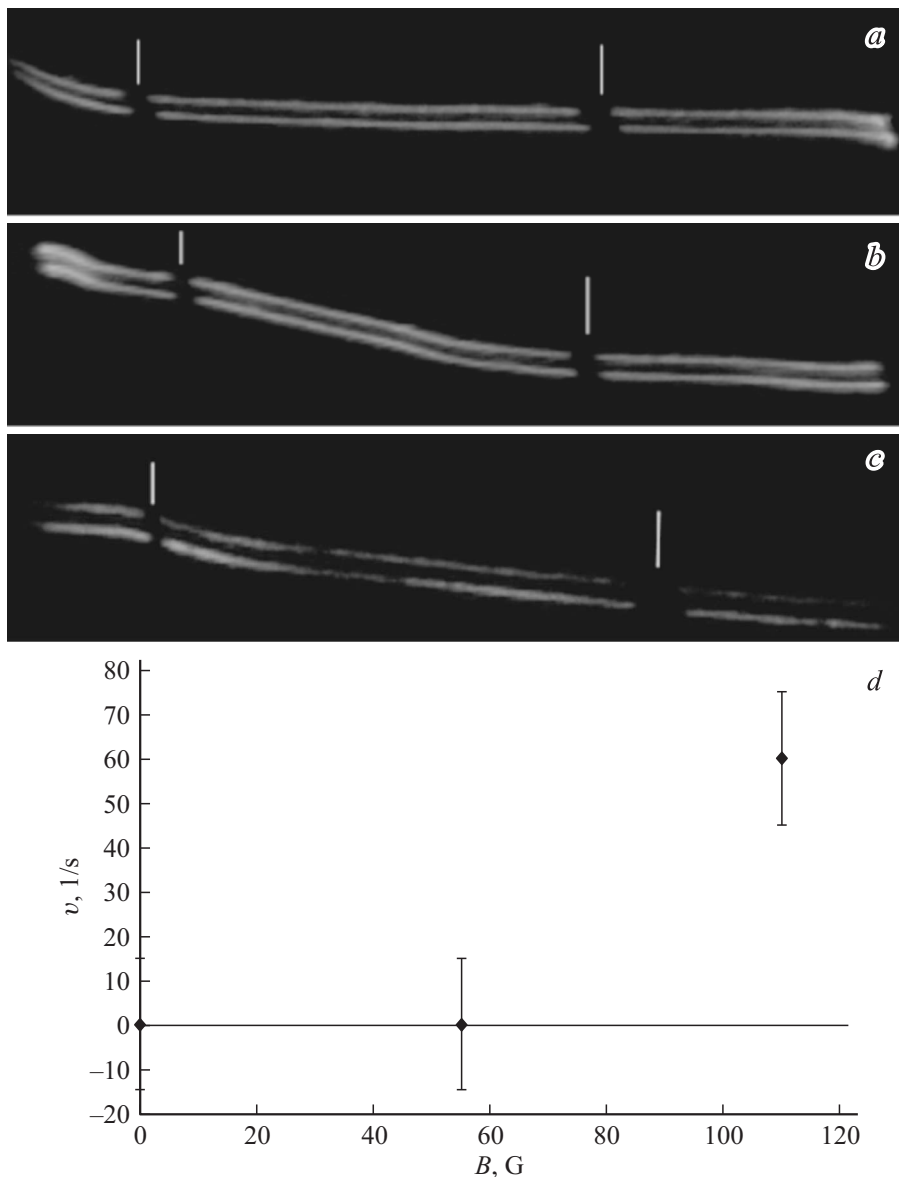


Рис. 3. Регистрация порогового эффекта раскручивания частицы в зависимости от магнитного поля. Три последовательных снимка координатной развертки частицы сферической формы при условиях: *a* — ток разряда $I = 2.5$ mA, давление $p = 40$ Pa, магнитное поле $B = 0$, газ неон. Модуляции не обнаруживаются $N = 0$; *b* — ток разряда $I = 2.5$ mA, давление $p = 40$ Pa, магнитное поле $B = 55$ G, газ неон. Модуляции не обнаруживаются $N = 0$; *c* — ток разряда $I = 2.5$ mA, давление $p = 40$ Pa, магнитное поле $B = 110$ G, газ неон. Модуляции появились (регистрация порогового эффекта вращения) $N = 2$, частота вращения 60 Hz; *d* — пороговый характер возникновения собственного вращения от магнитного поля для сферической частицы, представленной на рис. *a–c*.

отброшенный нами в [4], обнаруживается при малых токах у всех частиц и требует интерпретации. Простейшее предположение может быть связано с перестройкой (усилением) потока в окрестности нахождения частицы в плазме на масштабе дебаевской длины. Над порогом наблюдается линейное увеличение частоты вращения с ростом тока разряда, которому пропорциональна в данном диапазоне параметров концентрация плазмы. Тогда переданный импульс раскручивает частицу, а сила трения о покоящийся газ разряда стабилизирует вращение. Частота вращения может быть выражена из равенства

моментов импульса от ионов и трения о газ как

$$v = \frac{9\eta en_i q_d}{4\pi^2 \epsilon_0 \rho_0 V_{Tn} a^2}, \quad (2)$$

где q_d — заряд частицы, a — ее радиус, V_{Tn} — тепловая скорость газа, ρ_n — плотность газа, n_i — концентрация ионов, ϵ_0 — электрическая постоянная. Выполненные численные оценки для типичных условий разряда при параметрах: $a = 20 \mu\text{m}$, $q_d = 10^5$ [13], $n_i = 10^9 \text{ cm}^{-3}$ дают величину порядка 100 Hz, что согласуется с экспери-

ментом при доле азимутального импульса η в 10–20%, что представляется вполне естественным.

Дополнительно в пользу сформулированной гипотезы собственного вращения частиц из-за потока плазмы на ее поверхность говорит наблюдение порогового эффекта раскручивания в зависимости от магнитного поля. Если частица раскручивается из-за дрейфового потока в разряде, продольного или радиального амбиполярного, то наличие продольного магнитного поля должно непрерывно менять угловую скорость вращения. А если поток (его азимутальная составляющая) возникает скачком при достижении током (концентрацией плазмы) определенной величины, то зависимость частоты вращения от индукции магнитного поля также будет иметь пороговый характер. Второй дополнительный эксперимент это подтверждает. По наблюдениям за несколькими десятками частиц было установлено, что при токе, близком к пороговому, наложение магнитного поля генерирует собственное вращение при значении индукции порядка 50–100 G, индивидуальном для каждой частицы. Пример зависимости порогового возникновения вращения в магнитном поле показан на рис. 3.

Заключение

В настоящей работе применен способ координатной развертки для регистрации собственного вращения уединенных пылевых частиц, и частиц, находящихся в пылевом кластере. Показано, что наличие кластера до 10 частиц не изменяет частоту вращения. Зарегистрирован пороговый эффект возникновения вращения частиц с формой, близкой к идеально сферической, от разрядного тока и магнитного поля. Сделано предположение, что вращение связано с моментом импульса, передаваемым ионами пылевой частице в процессе поддержания ее стационарного заряда. Численная оценка частоты вращения согласуется с экспериментом. Полученные результаты позволяют развить модель раскручивания заряженных пылевых волчков для описания парамагнитных свойств комплексной плазмы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 14–02–00313.

Список литературы

- [1] Sato N. // AIP Conf. Proc. 2005. Vol. 799. P. 97.
- [2] Ishihara O., Sato N. // IEEE Trans. Plasm. Scien. 2001. Vol. 29. P. 179.
- [3] Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Ivanov A.Yu., Eikhval'd A.I. // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74. P. 066 403.
- [4] Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Eikhval'd A.I. et al. // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 026 406.
- [5] Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Ermolenko M.A., Golubev M.S., Ivanov A.Yu. // Contr. Plasma Phys. 2011. Vol. 51. P. 509.
- [6] Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Петров О.Ф. // ЖЭТФ. 2012. Т. 141. № 1. С. 189.
- [7] Hutchinson I.H. // New Jour. Phys. 2004. Vol. 6. P. 43.1.
- [8] Tsytoich V., Vladimirov S. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. Vol. 32. P. 659.
- [9] Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю. // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 7. С. 51.
- [10] Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю. // Физ. плазмы. 2012. Т. 38. № 7. С. 591.
- [11] Fortov V.E., Mofill G.E. *Complex and dusty plasmas: from laboratory to space* (Taylor & Francis Group, New York) 2010.
- [12] Tsytoich N.V., Sato N., Morfill G.E. // New Jour. Phys. 2003. Vol. 5. P. 43.
- [13] Fortov V.E., Nefedov A.P., Molotkov V.I. et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 205 002.