

А.Р. Абдрахманов, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов

Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,  
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической  
физики, 050040, г. Алматы, Казахстан

[abdirakhmanov@physics.kz](mailto:abdirakhmanov@physics.kz)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований формирования плазменно-пылевых структур в разряде постоянного тока в магнитных полях с индукцией до 400 Гс. В слабых магнитных полях вращение происходит против часовой стрелки, то есть угловая скорость  $\omega$  и индукция магнитного поля  $\mathbf{B}$  направлены в противоположные стороны:  $\omega \downarrow \mathbf{B}$ . С увеличением поля пылевая структура замедляется и при некотором значении  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0$  останавливается, а при дальнейшем увеличении начинает вращаться в обратную сторону:  $\omega \uparrow \mathbf{B}$ . Во время проведения эксперимента была получена зависимость угловой скорости от индукции магнитного поля при разных значениях давления и разрядного тока.

**Ключевые слова:** газовый разряд, пылевая плазма, магнитное поле, плазменно-пылевая структура, вращательное движение.

### Введение

Пылевая плазма представляет собой ионизованный газ с твердыми частицами. Она широко распространена в природе (в планетных кольцах, хвостах комет, межпланетных и межзвездных облаках). В лабораторных условиях пылевую плазму получают с помощью конденсированных частиц (частицы с размерами от 0.01 до 100 мкм), помещая их в плазму. Присутствие пыли в плазме существенно влияет на коллективные процессы.

Необходимость исследований по управлению пылевой плазмой связана с развитием технологии плазменного напыления, травления в микроэлектронике, а также реализацией термоядерной энергетики [1-4].

Одним из возможных способов воздействия на пылевую плазму является наложение внешнего магнитного поля. Впервые исследования плазменно-пылевых структур в стратах в магнитном поле проводились в работах [5,6], где были обнаружены вращение и инверсия направления вращения без изменения направления магнитного поля. В вышеуказанных работах данный эффект интерпретируется следующим образом: в слабых

магнитных полях, когда структура вращается по часовой стрелке, вращение вызывается силой ионного увлечения, так как радиальный поток ионов в амбиполярном поле движется от оси разряда к стенке трубки, приобретая в магнитном поле азимутальный импульс. Для больших магнитных полей, когда структура вращается против часовой стрелки, была выдвинута следующая гипотеза: при наличии пылевой структуры в страте в большом магнитном поле поток ионов будет двигаться от стенки трубки к структуре. Тогда направление силы ионного увлечения в магнитном поле меняется на противоположное [7]. На данный момент опубликовано немало работ по данной тематике, но до сих пор не было представлено конкретных объяснений инверсии вращения.

При изучении наступления инверсии направления вращения плазменно-пылевых структур в сильных магнитных полях рассматривается ряд теоретических моделей, таких как обращение радиального ионного потока, связанного либо с локальным обращением поля, либо с наступлением рекомбинации на пылевой структуре; действие торцевых и краевых эффектов, увлечение

вращающимся газом из-за вихревого тока в страте[8].

Актуальностью данной задачи является изучение нескольких конкурирующих механизмов, которые способствуют вращению пылевых структур.

### Экспериментальная установка.

Эксперименты проводились на установке (рисунок 1) для изучения вращения пылевых структур при наложении магнитного поля. Создающие магнитное поле катушки были надеты на трубку и разведены на расстояние 9 см. Съемка на видеокамеру производилась сверху. Для определения степени неоднородности распределения магнитного поля в зазоре использовался датчик Холла. Зависимость величины магнитного поля между соленоидами от высоты на оси трубки представлена на рисунке 2.

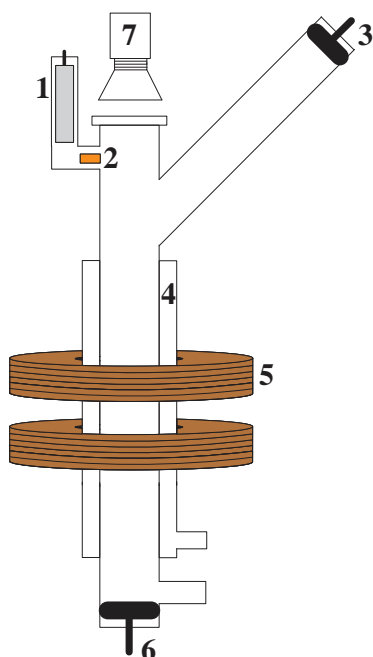


Рисунок 1.- Экспериментальная установка для исследования влияния магнитного поля на пылевую плазму: 1 - датчик давления ПМТ-6-3М, 2-контейнер с пылевыми частицами, 3-анод, 4-вакуумная рубашка, 5-соленоиды, 6-катод,7-видеокамера.

Разрядная камера была установлена вертикально катодом вниз. Внутри ее была помещена сужающая канал тока вставка (диафрагма), с целью уменьшения влияния катодного пятна на стабильность разряда и формирования стоячих страт, а также ее по-

ложение заданной высоты первой стоячей страты, т.е. пылевой ловушки, в удобном для наблюдения месте. Контейнер с пылевыми частицами, имеющий сетчатое дно, располагался в верхней части трубки. При встряхивании контейнера пылевые частицы попадали в объем разряда (страт), тем самым образуя слоистую плазменно-пылевую структуру. Подсветка нужного сечения слоя пылевых структур осуществлялась с помощью твердотельного зеленого лазерного ножа.

Для регистрации рассеянного света от отдельных частиц пылевой структуры использовалась скоростная видеокамера. Изображение с камеры записывалось в файл на компьютер с помощью платы видео захвата «Pinnacle Systems».

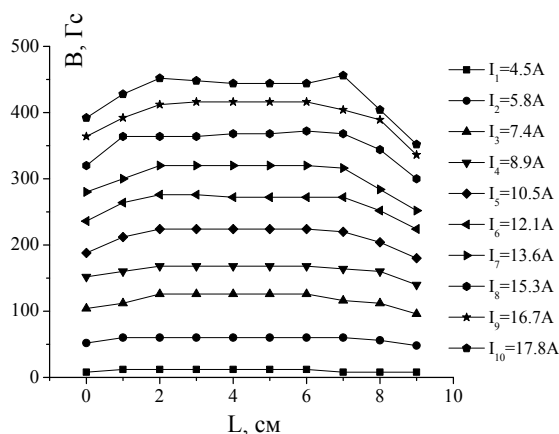


Рисунок 2.- Зависимость величины магнитного поля между соленоидами от высоты по оси трубки(отсчет высоты ведется от верхнего торца нижнего соленоида).

Оптимальные условия для тока разряда варьировались от 0,5 мА до 2мА, дальнейшее увеличение значения тока разрушало плазменно-пылевую структуру, превращая ее в вертикальную цепочку в середине страты, а при уменьшении тока приводило к погашению разряда.

Изменение давления в камере в сторону увеличения концентрации газа немного замораживало общее колебание пылевой структуры. Дальнейшее увеличение давления приводило к превращению стратифицированного разряда в сплошной, в котором уже отсутствовали пылевые структуры. Границы оптимальных условий - от 0,15 до 0,25 торр[9].

**Результаты экспериментов.**

Детальное наблюдение за пылевой структурой из полидисперсных частиц (1-10 мкм) в стратах показало сложный характер ее поведения во внешнем магнитном поле. Для понимания картины движения было проведено исследование с достаточно упорядоченной структурой. Для каждого набора параметров разряда проводились три измерения в верхнем, нижнем и среднем сечении структуры. Расстояния между сечениями выбирались, исходя из вертикальных размеров структуры, которые изменялись вместе с формой страты в разных магнитных полях.

Результаты наблюдений: при включении магнитного поля структура приходит во вращение. Угловые скорости вращения частиц в каждом горизонтальном сечении определялись как отношение их линейных скоростей к радиусам вращения. Полученная величина для характеристики сечения обозначена  $\langle \omega \rangle$ . Она представляет собой значение средней угловой скорости плазменно-пылевого слоя.

Далее с помощью инструментов графических редакторов определялась угловая скорость вращения плазменно-пылевых структур. График зависимости  $\langle \omega \rangle = f(B)$  для трех сечений представлен на рисунке 4.

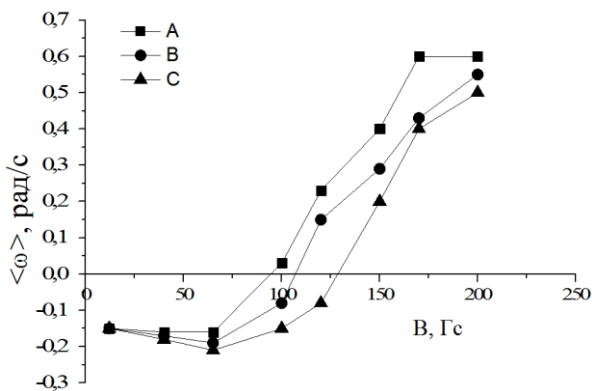


Рисунок 4.- Зависимость средней угловой скорости пылевых частиц от магнитного поля: а) верхний, б) средний и в) нижний слой. Условия эксперимента:  $I=1.4$  мА,  $p=0.25$  Торр.

Как видно из графика при значении 90-130 Гс наблюдается эффект обратного вращения структуры, что возможно обусловлено изменением направления радиальных то-

ков в плазме. В эксперименте можно было заметить, что нижние слои пылевого облака останавливаются (между направлениями вращения) при несколько меньшем значении магнитного поля, чем верхние.

Инверсия направлений вращения плазменно-пылевых структур в стратах в магнитном поле могла быть вызвана вращением газа под действием момента силы Ампера в области сужения токового канала диэлектрической вставки.

Для проверки влияния сужения токового канала был поставлен следующий эксперимент. Из разрядной трубки была извлечена диафрагма и проведено наблюдение за вращением пылевой структуры. Было измерено значение угловой скорости под воздействием магнитного поля. После обработки результатов выяснилось, что присутствие вставки не имеет заметного влияния на вращение пылевых структур. На рисунке 5 представлена зависимость угловой скорости от магнитного поля.

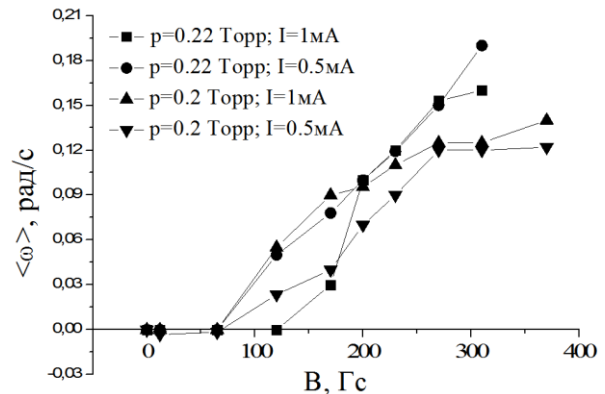


Рисунок 5.- Зависимость средней угловой скорости пылевых частиц от магнитного поля (без вставки).

Как видно из рисунка 5, сужающийся канал тока только меняет значение угловой скорости. В слабых магнитных полях величина угловой скорости пылевых структур равна  $\sim 0.01$  рад/с. При разных давлениях и токах величина угловой скорости меняется. Таким образом, можно заключить, что в области, где измерялось вращение, присутствие диафрагм влияет только на величину угловой скорости. Это отчетливо видно при сравнении экспериментальных результатов со вставкой и без (рисунок 6).

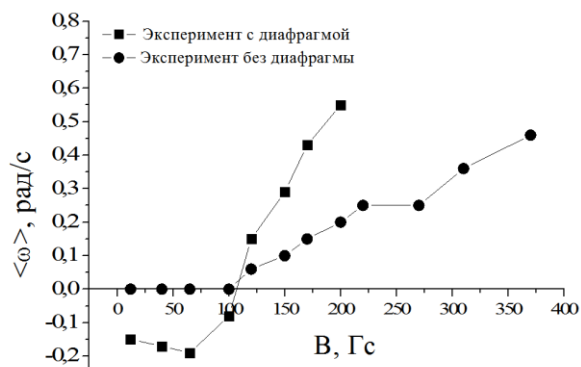


Рисунок 6.-Зависимость средней угловой скорости пылевых частиц от магнитного поля (красная линия-без вставки, черная линия- со вставкой). Условия эксперимента:  $p=0.25 \text{ Torr}, I=1.5 \text{ mA}$ .

Это объясняется тем, что при использовании вставки сила ионного увлечения, действующая на пылевую структуру, становится больше, чем при ее отсутствии. Данный эффект обуславливается сужением токового канала, в результате появляется градиент концентрации в двух местах (в верхнем конце вставки и в положении пылевой структуры).

### Заключение

В результате проведенных экспериментов по исследованию влияния магнитного поля на пылевые структуры в тлеющем разряде постоянного тока были получены следующие результаты:

- проведены наблюдения за изменениями свойств пылевой плазмы тлеющего разряда в магнитном поле;
- получены вихревые движения пылевых частиц;
- обнаружен «эффект обратного вращения» пылевых структур;
- определена зависимость угловой скорости движения пылинок от величины магнитного поля;
- определено влияние сужающегося канала тока на вращение плазменно-пылевых структур.

Авторы выражает огромную благодарность профессору СПбГУ В.Ю.Карасеву за обсуждение результатов.

Работа была выполнена при поддержке МОН РК в рамках гранта «Лучший преподаватель вузов 2015»

### Литература

- 1 Selwyn G S, Haller K L, Patterson E F J. Vac. Sci. Technol. A 11 1132 (1993).
- 2 Kersten H et al. Contrib. Plasma Phys. – 2001. –V.41. P.598.
- 3 J.C. Flanagan, M. Sertoli, M. Bacharis et al. Characterising dust in JET with new ITER-like wall // Plasma physics and controlled fusion. – 2015. –V.57. – P.014037.
- 4 Winter J, Gebauer G J. Nucl. Mater. – 1999.- V.288 –P.266-269.
- 5 Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И., Дзлиева. Е.С. Применение зондирующих пылевых частиц для исследования стратифицированного разряда с плазменнопылевыми структурами в магнитном поле // Опт. и Спектр. – 2006. – Т.101.№3. Стр. 511-517.
- 6 Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ivanov A.Yu., Eikhval'd A.I. Rotational motion of dusty structures in glow discharge in longitudinal magnetic field // Phys.Rev. E-2006 –V.74.№6 – P.066403.1-12
- 7 Магнитные и механические эффекты в пылевых образованиях и в газовом разряде. Док. дисс. Карасева В.Ю. 2010 г.
- 8 Исследование динамики пылевых частиц в структурах в стратах тлеющего разряда в магнитном поле. Канд. дисс. Павлова С.И.2015г. Абдрахманов А.Р. Вращение плазменно-пылевых структур в магнитном поле. Тезисы докладов Международной конференции студентов и молодых ученых «МИР НАУКИ».- 2016. Стр. 265.

**Принято к печати 22.10.2016**

А.Р. Абдрахманов, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов

Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,  
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической  
физики, 050040, г. Алматы, Казахстан  
[abdirakhmanov@physics.kz](mailto:abdirakhmanov@physics.kz)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований формирования плазменно-пылевых структур в разряде постоянного тока в магнитных полях с индукцией до 400 Гс. В слабых магнитных полях вращение происходит против часовой стрелки, то есть угловая скорость  $\omega$  и индукция магнитного поля  $\mathbf{B}$  направлены в противоположные стороны:  $\omega \downarrow \mathbf{B}$ . С увеличением поля пылевая структура замедляется и при некотором значении  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0$  останавливается, а при дальнейшем увеличении начинает вращаться в обратную сторону:  $\omega \uparrow \mathbf{B}$ . Во время проведения эксперимента была получена зависимость угловой скорости от индукции магнитного поля при разных значениях давления и разрядного тока.

**Ключевые слова:** газовый разряд, пылевая плазма, магнитное поле, плазменно-пылевая структура, вращательное движение.

А.Р.Әбдірахманов, М.Қ.Досболаев, Т.С.Рамазанов

Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Экспериментальды және теориялық физика ғылыми зерттеу институты, 0500400, Алматы, Қазақстан.  
[abdirakhmanov@physics.kz](mailto:abdirakhmanov@physics.kz)

## МАГНИТ ӨРІСІНДЕГІ ПЛАЗМАЛЫ-ТОЗАҢДЫ ҚҰРЫЛЫМНЫҢ АЙНАЛМАЛЫ ҚОЗҒАЛЫСЫН ЭКСПЕРИМЕНТТЕ ЗЕРТТЕУ

### Аннотация.

Аталған жұмыста сыртқы магнит өрісінің индукциясының шамасы 400 Гауссқа дейінгі тұрақты токты разрядта түзілген плазмалы-тозаңды құрылым қасиеттерін эксперименттік зерттеу нәтижелері баяндалған. Әлсіз магнит өрісінде айналмалы қозғалыс сағат тіліне қарама-қарсы бағытқа ие, яғни тозаңды құрылымның бұрыштық жылдамдығымен магнит өрісінің индукциясының бағыты қарама-қарсы  $\omega \downarrow \mathbf{B}$ . Магнит өрісінің шамасын арттырған кезде тозаңды құрылымның айналу жылдамдығы бәсеңсіп,  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0$  шамасы кезінде айналмалы қозғалыс тоқтайды. Магнит өрісінің шамасының жоғары мәнінде тозаңды құрылымның айналмалы қозғалысының бағыты өзгереді  $\omega \uparrow \mathbf{B}$ . Эксперимент барысында әр түрлі газ қысымы мен разряд тогының шамасында плазмалы-тозаңды құрылымның бұрыштық жылдамдығының магнит өрісі индукциясынан тәуелділігі алынды.

**Маңызды сөздер:** газдық разряд, тозаңды плазма, магнит өрісі, плазмалы-тозаңды құрылым, айналмалы қозғалыс.

**A.R.Abdirakhmanov, M.K.Dosbolayev, T.S.Ramazanov**

*Al-Farabi Kazakh National University Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical  
Physics, 050040, Almaty, Kazakhstan*

[abdirakhmanov@physics.kz](mailto:abdirakhmanov@physics.kz)

## **EXPERIMENTAL STUDY OF ROTATION OF DUST STRUCTURES IN MAGNETIC FIELD**

**Abstract:** In this paper the results of experimental studies of the formation of plasma-dust structures in a dc discharge in a magnetic field with the induction of 400 gauss are presented. In weak magnetic fields, the rotation is counterclockwise, that is, the angular velocity  $\omega$  and the magnetic field  $\mathbf{B}$  are directed opposite to each other:  $\omega \downarrow \mathbf{B}$ . In increasing magnetic field dust structures slow down and at some value of  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0$  they stop. And further increasing leads to rotation in the opposite direction ( $\omega \uparrow \mathbf{B}$ ). During the implementation of the experiment the dependences of the angular velocity on the magnetic field at different values of pressure and current were obtained.

**Keywords:** gas discharge, dusty plasma, magnetic field, plasma-dust structure, rotational movement.