

А.Р. Әбдірахманов, С.К.Коданова, М.К.Досболаев, Т.С. Рамазанов
*Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
 Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической
 физики, 050040, г. Алматы, Казахстан*
abdirakhmanov@physics.kz

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментальной исследования о влиянии внешнего магнитного поля на пылевую структуру, которые были взвешены в стратах тлеющего разряда постоянного тока. Наблюдения проводились в стратах, расположенных между катушками, под катушкой и над катушкой. Наблюдалась динамика пылевых структур в стратах, о чем ранее не сообщалось в аналогичных экспериментальных работах. В ходе эксперимента было обнаружено, что пылевая структура взвешенных в стратах тлеющего разряда постоянного тока вращается по часовой стрелке над катушкой против часовой стрелки под катушкой, а пылевая структура, расположенной между катушками, не вращается по горизонтальной плоскости. Магнитное поле направлено вверх. Измерена зависимость средней угловой скорости пылевых структур от индукции магнитного поля в разных исследуемых областях. Было измерено продольное и поперечное компонент магнитного поля в активной области с помощью датчика Холла. Было сделано интерпретация поведения плазменно-пылевых структур в стратах тлеющего разряда постоянного тока.

Ключевые слова: газовый разряд постоянного тока, пылевая плазма, магнитное поле, плазменно-пылевая структура.

Введение

Пылевая плазма встречается в разных средах, например, в планетарных кольцах [1], а также в экспериментах по термоядерному синтезу [2]. Один из компонентов пылевой плазмы, заряженная частица пыли может существенно влиять на параметр и свойства плазмы. Первоначально исследование пылевой плазмы было мотивировано проблемой контроля и удаления пылевых частиц из технологических установок.

Изучение пылевых структур в высокочастотном (RF) разряде в магнитном поле впервые было опубликовано в работах [3-5], а результаты, полученные с использованием тлеющего разряда постоянного тока (DC) в магнитном поле, были представлены в работах [6-7]. В работе [8] и [9] изучены свойства пылевой плазмы в сильном магнитном поле в ВЧ разряде и в разряде постоянного тока. В работе [6] сообщалось о «вращательной инверсии» плазменных пылевых структур.

В настоящее время известны несколько механизмов, объясняющих эффект «ре-

версивного вращения». Первым из них является изменение потока радиальных ионов за счет усиления магнитного поля [10]. Второй механизм – существование вихревого тока в стратах [11]. Другие работы Недоспасовы А.Р. [12-13] где указан, что вращение газа обусловлено силой Ампера, которая появляется вблизи торцевых поверхностей соленоида и в сужении поперечного сечения разрядного канала, может оказать значительное влияние на пылевую структуру. В работе [14] теоретические объяснения из [12-13] были проверены экспериментально. Также, было исследовано и влияние краевого эффекта соленоида на динамику плазменно-пылевых структур. С этой целью был создан специальный модернизированный длинный соленоид, в котором вся плазменная область находилась внутри катушки, то есть в область однородного магнитного поля. Показано, что инверсия направления вращения пылевых структур не связана с действием краевого эффекта.

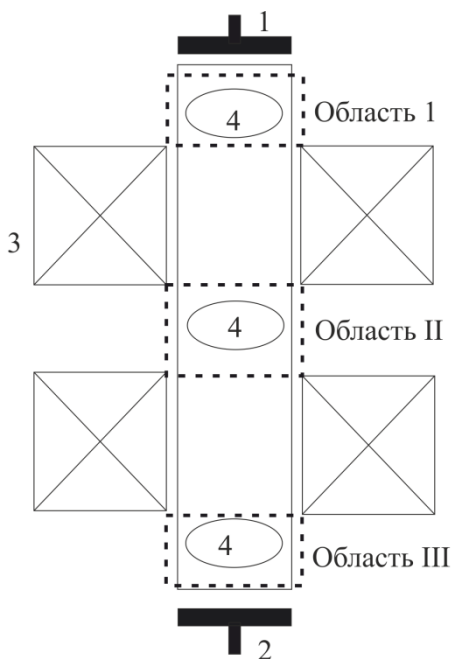
В аналогичных экспериментах [6] с использованием разряда постоянного тока использовалась диафрагма (вставка, которая

сужает радиус разряда) [6-7, 10]. Эта диафрагма, используется для получения устойчивых постоянных слоев-первой стоячая слоя над диафрагмой. Последнее также уменьшает влияние катодного пятна на параметры разряда. Отличием наших работ от идентичных экспериментов [6] является отсутствие диафрагмы.

В нашем эксперименте мы обнаружили, что стабильный стратифицированный тлеющий разряд без диафрагмы может быть реализован путем изменения параметров разряда. Это возможно из-за различного расположения электродов и меньшего диаметра разрядной трубки по сравнению с использованием в работах, описанных в [6-7, 10].

Экспериментальная установка.

Экспериментальная установка представляет собой вертикально ориентированную разрядную трубку. Мы используем газ аргона для заполнения трубки. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.



1-анод, 2-катод, 3- катушка, 4-страты с пылевыми частицами.

Рисунок 1 – Экспериментальная установка
 Давление газа составляло 0,2-0,25 торр. Рабочий диапазон тока разряда составлял 1-2 мА. При этих параметрах со-

здаются стабильные страты без сужающего канала тока вставки.

Как уже упоминалось, пылевые частицы левитируют в стратах, образуя трехмерные упорядоченные структуры (плазменно-пылевые структуры). Визуализация пылевых частиц осуществлялась посредством освещения с помощью лазерного луча. Рассеянный свет записывался видеокамерой со скоростью 250 кадров в секунду. Магнитное поле создается с помощью катушки Гельмгольца. Наблюдения проводились в слоях, расположенных между катушками, под и над катушкой.

Результаты экспериментов.

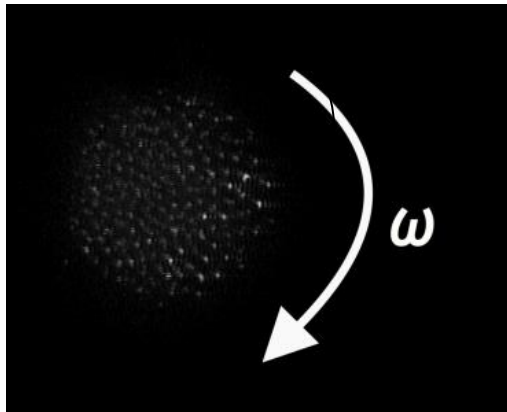
Вид сверху на пылевые структуры в стратах показан на рисунке 2.

Диаметр пылевых структур варьируется от 2,5 мм до 2 мм в зависимости от значения магнитного поля. Из-за различных размеров пылевых частиц; структура пыли имела многослойную секцию. Наблюдения проводились в трех регионах (как показано на рисунке 1). Первая область (I), где была сформирована пылевая структура, находится над катушкой, вторая область (II) находится между катушками, а третья область (III) находится под катушкой. Когда включалось магнитное поле, частицы пыли в областях I и III имели вращательное движение на горизонтальной плоскости. Движения по часовой стрелке и против часовой стрелки наблюдались соответственно в областях I и III, тогда как структура пыли в области II не вращалась.

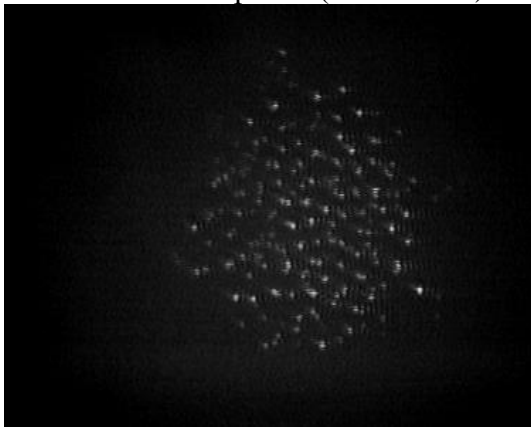
Зависимость средней угловой скорости пылевых структур от индукции магнитного поля в трех областях показана на рисунке 3. При увеличении магнитного поля средняя угловая скорость пылевых структур увеличивается в областях I и III. Максимальные угловые скорости пылевых структур составляют 1,1 рад / с в области I и 1,3 рад / с в области III.

В эксперименте магнитное поле измерялось с помощью тесламетра (PHYWE) с погрешностью 5%. Магнитную индукцию **B** можно рассматривать как

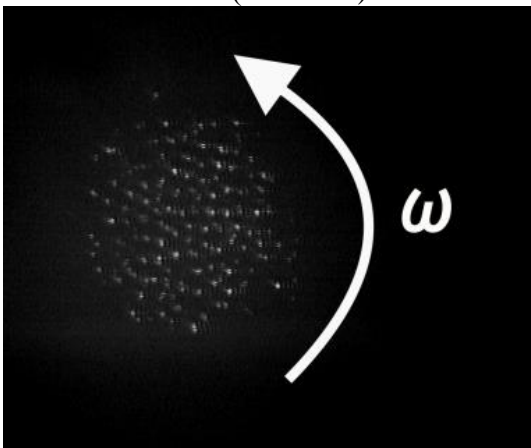
сумму продольных V_{\parallel} (по вертикали вдоль трубки) и поперечных компонентов V_{\perp} (как показано на рисунке 4).



а) область I—пылевая структура вращается по часовой стрелке ($B \approx 19\text{mT}$)



б) область II—пылевая структура не вращается ($B \approx 19\text{mT}$)

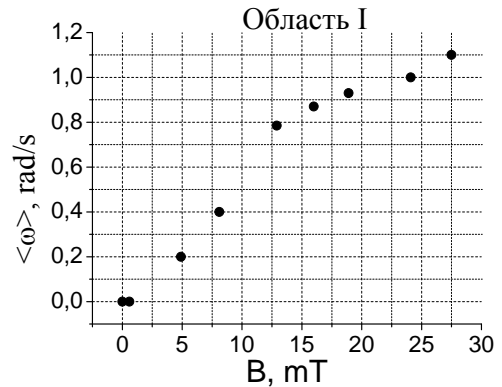


с) область III—пылевая структура вращается против часовой стрелки ($B \approx 19\text{mT}$)

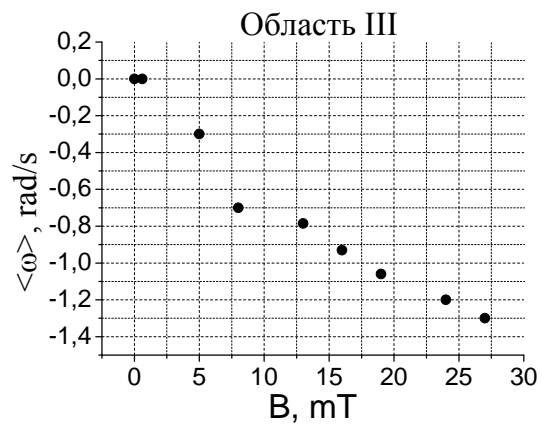
Рисунок 2 — Пылевая структура в стратах в трех областях (как показано на рисунке 1) и иллюстрация их вращения

Вращательное движение происходило в скрещенных электрических и магнитных полях; где радиальная составляющая потока ионов, которая испытывает отклонение в

вертикальном магнитном поле, приводит к возникновению азимутальной силы ионного увлечения [9-11].



а)



б)

Рисунок 3 – Зависимость угловой скорости пылевых структур от магнитного поля

Направление вращения определяется силой Лоренца. Отметим также, что пылевые структуры в страте в горизонтальной плоскости удерживаются за счет радиального электрического поля.

По мере увеличения силы магнитного поля уменьшался размер плазмы в радиальном направлении (пинч-эффект). Об этом свидетельствует потеря частиц пыли, что приводит к уменьшению диаметров пылевых структур примерно от 2,5 до 2 мм. В области II структура пыли не вращалась. В области III линии магнитного поля направлялись от стены к центру. В области I направлялись от центра к стене. Соответственно, в областях I и III структура пыли вращается в противоположных направлениях. Причины отсутствия вращательного движения в области II связаны с тем, что линии магнитного поля и

направленная скорость заряженных частиц не пересекаются.

Вывод

Пылевые структуры в первой и третьей областях находились в разных конфигурациях линий магнитного поля. В первой области линии индукции магнитного поля расходятся от центра трубки, а в третьей области сходятся к центру. Поэтому пылевые структуры в этих областях вращаются в противоположных направлениях. Мы измерили зависимость средней угловой скорости от индукции магнитного поля в разных областях.

Мы планируем продолжить это исследование, рассмотрев трубки разных диаметров. Кроме того, планируется теоретическое исследование и моделирование наблюдаемых процессов. В этих будущих исследованиях будет представлена дополнительная информация о роли различных механизмов (таких как сила ионного сопротивления, вращение силы, индуцированной силой Ампера, и другие краевые эффекты) в управлении динамикой плазменно-пылевых структур в магнитном поле.

Работа была выполнена при поддержке МОН РК в рамках гранта AP05133536.

Список литературы

- 1 G. Goertz (1989, May). Dusty plasmas in the solar system. *Reviews of Geophysics* 27, p. 271-292
- 2 J. Winter (1998). Dust in fusion devices- Experimental evidence, possible sources and consequences. *Plasma Physics and Controlled Fusion* 40, p.1201-1210
- 3 N. Sato, G. Uchida, T. Kaneko, S. Shimizu, and S. Iizuka (2001, May). Dynamics of fine particles in magnetized plasmas. *Phys. Plasmas* 8, p. 1786-1790
- 4 U. Konopka, D. Samsonov, A. V. Ivlev, J. Goree, V. Steinberg, and G. Morfill (2000, February). Rigid and differential plasma crystal rotation induced by magnetic fields. *Phys. Rev. E* 61, p.1890
- 5 P. K. Kaw, K. Nishikawa, and N. Sato (2002, February). Rotation in collisional strong-

lycoupled dusty plasmas in a magnetic field. *Phys. Plasmas* 9, p.387

6 V. Y. Karasev, A. I. Eikhvald, E. S. Dzlieva, and A. Y. Ivanov (2006). Rotational motion of dusty structures in glow discharge in longitudinal magnetic field. *Phys. Rev* 74, p. 066403

7 M. M. Vasiliev, L. G. D'yachkov, S. N. Antipov, R. Huijink, O. F. Petrov, V. E. Fortov (2011, January). Dynamics of dust structures in a DC discharge under action of axial magnetic field. *EPL* 93, p. 15001

8 E. Jr. Thomas, B. Lynch, U. Konopka, R. L. Merlino, and M. Rosenberg (2015, March). Observations of imposed ordered structures in a dusty plasma at high magnetic field. *Phys. Plasmas* 122, pp. 030701

9 V. Y. Karasev, E. S. Dzlieva, S. I. Pavlov, L. Novikov, S. Maiorov (2018, April). The rotation of complex plasmas in a stratified glow discharge in the strong magnetic field. *Plasma IEEE Transactions on Plasma Science* 46, p. 727-730

10 E. S. Dzlieva, V. Yu. Karasev, S. I. Pavlov, M. A. Ermolenko, L. A. Novikov and S. A. Maiorov (2016, April). A Calculation of the Electron Temperature of Complex Plasma of Noble Gases Mixture in CCRF Discharge. *Contributions to Plasma Physics* 56, p.197-203

11 E. S. Dzlieva, V. Y. Karasev, and S. I. Pavlov (2015, June). Detection of eddy current in the striation. *EPL* 110, p. 55002

12 A. V. Nedospasov (2009, March). Motion of plasma-dust structures and gas in a magnetic field. *Phys. Rev. E* 79, p.036401

13 A. V. Nedospasov, Nenova, N. V. (2014, November). Gas rotation in discharge with moving strata in longitudinal magnetic field. *EPL* 108, p. 45001

14 A. R. Abdirakhmanov, M. K. Dosbolayev, T. S. Ramazanov (2018, January). The Gas Discharge Dusty Plasma in a Uniform Magnetic Field. *AIP Conference Proceedings* 1925, p 020007

15 M. K. Dosbolayev, A. R. Abdirakhmanov, S. K. Kodanova, T. S. Ramazanov, Zh. A. Moldabekov (2018, May). Plasma-dust structures in the DC discharge. 15th Dusty Plasma Workshop. p58

Принято к печати 15.09.2018

Приложение 1

В результате измерения было получено отношение продольной составляющей магнитного поля к поперечной составляющей магнитного поля (таблица 1).

Таблица 1. – Распределения магнитного поля

	Y L	0.4A		1.6A		3A		4.5A		5.8A		7A		8.4A		9.8A		11.4A	
		B_{\parallel}	B_{\perp}	B_{\parallel}	B_{\perp}	B_{\parallel}	B_{\perp}	B_{\parallel}	B_{\perp}	B_{\parallel}	B_{\perp}	B_{\parallel}	B_{\perp}	B_{\parallel}	B_{\perp}	B_{\parallel}	B_{\perp}	B_{\parallel}	B_{\perp}
I область	1.5см	0.49	0.11	4.1	1.13	6.4	2.5	10.2	4.1	12.9	5.7	15.9	6.8	20	9.3	24	10	28	11
	1см	0.59	0.09	4.9	0.96	8.1	1.6	12.9	3.2	16	4	18.9	5.1	24.1	7.1	27.5	8	31.4	8.5
	0см	0.69	0.08	5.6	0.82	9.9	1.43	14.6	2.2	19.1	3.19	23	3.9	27.9	5.3	31.3	6.8	35.3	7
II область	1.5см	0.69	0.08	5.6	0.83	9.9	1.43	14.6	2.2	19.1	3.19	23	3.8	27.9	5.4	31.3	6.8	35.3	7.1
	1см	0.69	0.08	5.6	0.83	9.9	1.43	14.6	2.2	19.2	3.2	23	3.8	27.2	5.4	31.2	6.8	35	7.1
	0см	0.68	0.08	5.69	0.84	9.9	1.4	14.7	2.2	19	3.23	23	3.9	27.6	5.5	31.4	6.9	35.2	7.4
	-1см	0.69	0.08	5.6	0.83	9.9	1.43	14.5	2.2	19.1	3.2	23	3.9	27.1	5.4	31.4	6.9	35	7.1
	-1.5см	0.69	0.08	5.6	0.83	9.9	1.43	14.6	2.1	19	3.19	23	3.8	28	5.3	31.2	6.8	35.1	7
III область	0см	0.69	0.08	5.5	0.82	10	1.43	14.6	2.2	19	3.19	23	3.8	28.2	5.3	31.5	6.8	35	7.1
	-1см	0.6	0.09	5	0.95	8	1.6	13	3.1	16	1	19	5	24	7.1	27	8	31	8.5
	-1.5см	0.51	0.11	4	1.13	6.5	2.5	10	3.9	13	5.7	16	7	20	9.2	24.1	10	28	11

А.Р. Әбдірахманов, С.К.Коданова, М.К.Досболаев, Т.С. Рамазанов
 Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
 Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической
 физики, 050040, г. Алматы, Казахстан
abdirakhmanov@physics.kz

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация. В этой статье приведены экспериментальные результаты о влиянии внешнего магнитного поля на пылевую структуру, которые были взвешены в стратах тлеющего разряда постоянного тока. Наблюдения проводились в стратах тлеющего разряда, расположенных между катушками, под катушкой и над катушкой. Мы наблюдали интересное динамичное поведение пылевых структур в стратах, о чем ранее не сообщалось в аналогичных экспериментальных работах. В ходе эксперимента было обнаружено, что пылевая структура взвешенных в стратах тлеющего разряда вращается по часовой стрелке над катушкой (I-область) и против часовой стрелки под катушкой (III-область), а структура пыли, расположенной между катушками (II-область), не вращается на горизонтальной плоскости. Линии магнитного поля направлены вверх. Измерена зависимость средней угловой скорости пылевых структур от индукции магнитного поля в разных исследуемых областях (I-III-область). Также было измерено продольное и поперечное компонент магнитного поля в исследуемой активной области с помощью датчика Холла. Дана интерпретация к поведению плазменно-пылевых структур в стратах в тлеющем разряде постоянного тока.

Ключевые слова: газовый разряд постоянного тока, пылевая плазма, магнитное поле, плазменно-пылевая структура.

A.R.Abdirakhmanov, S.K.Kodanova, M.K. Dosbolayev, T.S.Ramazanov
Al-Farabi Kazakh National University
Institute of Experimental and Theoretical Physics, 050040, Almaty, Kazakhstan
abdirakhmanov@physics.kz

ROTATIONAL MOVEMENT OF PLASMA-DUST STRUCTURES UNDER EXPOSURE TO THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD

Abstract: This article presents experimental results on the effect of an external magnetic field on the dust structure, which was suspended in strata of a dc glow discharge. Observations were carried out in strata of a glow discharge located between two coils, under the coil, and above the coil. We observed an interesting dynamic behavior of dust structures in the strata, which was not previously reported in similar experimental works. During the experiment, it was found that the dust structure suspended in strata of a glow discharge rotates clockwise above the coil (I region) and counterclockwise under the coil (III region), and the dust structure located between the coils (II region) does not rotate on horizontal plane. The magnetic field lines are directed upwards. The dependence of the average angular velocity of dust structures on the induction of the magnetic field in different regions (I-III region) was measured. The longitudinal and transverse components of the magnetic field in the active region under study were also measured using a Hall sensor (Appendix A). An interpretation was made of the behavior of plasma-dust structures in the strata in a dc glow discharge.

Keywords: DC glow discharge, dusty plasma, magnetic field, plasma-dust structure.

А.Р. Әбдірахманов, С.К. Коданова, М.К. Досболаев, Т.С. Рамазанов
Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,
Экспериментальды және теориялық физика ғылымизерттеу институты,
0500400, Алматы, Қазақстан.
abdirakhmanov@physics.kz

СЫРТҚЫ МАГНИТ ӨРІСІНДЕГІ ПЛАЗМАЛЫ-ТОЗАҢДЫ ҚҰРЫЛЫМНЫҢ АЙНАЛМАЛЫ ҚОЗҒАЛЫСЫ

Аннотация. Бұл мақалада сыртқы магнит өрісінің тұрақты токты солғын разрядтың (DC разряд) стратасында түзілген тозаңды құрылымға әсерінің эксперименттік нәтижелері көрсетілген. Зерттеу жұмысы екі катушканың саңылауында (II аймақ), катушканың жоғарғы бөлігінде (I аймақ) және төменгі бөлігіндегі (III аймақ) орналасқан тұрақты токты солғын разрядтың стратасында жүргізілді. Тозаңды құрылымның бұрынғы ұқсас (аналогты) эксперименттік жұмыстарда байқалынбаған ерекше динамикалық қозғалысы бақыланды. Эксперимент барысында солғын разрядтың стратасында шоғырланған тозаңды құрылым катушканың жоғары бөлігінде (I аймақ) сағат тілінің бағытымен айналса, ал катушканың төменгі бөлігінде (III аймақ) сағат тіліне қарама қарсы бағытқа ие екені анықталды. Екі катушканың саңылауындағы (II аймақ) тозаңды құрылым горизонтальды бетте айналмалы қозғалысқа ие емес. Магнит өрісінің күш сызықтары жоғары бағытталған. Әр түрлі зерттелген аймақта (I-III аймақ) тозаңды құрылымның орташа бұрыштық жылдамдығының магнит өрісінің индукциясынан тәуелділігі есептелді. Сондай-ақ зерттелген активті аймақта (зерттелінген аймақ) Холл датчигінің көмегімен магнит өрісінің көлденең және бойлық құраушылары өлшенді (Қосымша А). Тұрақты токты солғын разрядтың стратасында шоғырланған плазмалы-тозаңды құрылымның қозғалысына интерпретация жасалынды.

Түйін сөздер: тұрақты токты газдық разряд, тозаңды плазма, магнит өрісі, плазмалы-тозаңды құрылым.