

УДК 537.525  
EDN: NZCJIV

PACS: 52.27.Lw; 52.50.Nr.

## Демпфирование колебаний заряженных микрочастиц в тепловом поле в плазме тлеющего разряда

Д. Н. Поляков, В. В. Шумова, Л. М. Василяк

*Экспериментально показано, что термофоретической силой, действующей в тепловом поле на микрочастицы в комплексной плазме, можно эффективно управлять облаком из заряженных микрочастиц, образующемся в электростатической ловушке страты положительного столба тлеющего разряда. Обнаружено, что изменение градиента температуры теплового поля приводит к изменениям местоположения облака в объёме плазмы, формы и размера облака и подавлению колебаний микрочастиц в направлениях поперечных этому градиенту. Обнаружено, что более сильное тепловое воздействие испытывают микрочастицы большего размера, а демпфирование колебаний микрочастиц происходит совместно с изменением пространственного расположения облака. Полученные экспериментальные результаты согласуются с теоретическими представлениями о рассматриваемых явлениях.*

*Ключевые слова:* комплексная плазма, заряженные микрочастицы, тлеющий разряд, облако микрочастиц, колебания, термофоретическая сила.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-12-18

### Введение

Плазма с конденсированной дисперсной фазой (КДФ) или пылевая (комплексная) плазма [1] служит рабочей средой в экспериментальных реакторах с неравновесной низкотемпературной плазмой [2]. Плазмохимические процессы, протекающие в нейтральной или химически активной плазме электрических (высокочастотного или постоянного тока)

разрядов, используются или могут применяться для синтеза и агломерации частиц КДФ микронных и субмикронных размеров [3], модификации их поверхности при травлении [4, 5] или нанесении на поверхность частиц ориентированных покрытий [6–8].

Частицы КДФ микронного размера (микрочастицы), скапливаясь в ограниченной области реакционного объёма, образуют левитирующее в плазме облако. Микрочастицы в облаке удерживаются, как правило, в стратах электрического разряда в плазменных и тепловых ловушках [9–11]. В таких ловушках силы электрического и теплового поля, а также силы увлечения потоками ионов, компенсируют воздействие на заряженные потоками электронов и ионов микрочастицы сил тяжести и силы электростатического расталкивания микрочастиц друг от друга. Форма облака, как правило, повторяет форму плазменной ловушки, а его стабильность зависит от равновесия сил на его внешней границе. Форма и размеры облака, количество и концентрация удерживаемых в облаке микрочастиц, а также

Поляков Дмитрий Николаевич<sup>1</sup>, с.н.с.

E-mail: cryolab@ihed.ras.ru

Шумова Валерия Валерьевна<sup>1,2</sup>, с.н.с, к.ф.-м.н.

Василяк Леонид Михайлович<sup>1</sup>, гл.н.с., д.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур  
Российской академии наук.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр химической  
физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук.  
Россия, 119991, Москва, ул. Косыгина, 4.

Статья поступила в редакцию 12.07.2024

После доработки 2.08.2024

Принята к публикации 7.08.2024

Шифр научной специальности: 1.3.2; 1.3.9

© Поляков Д. Н., Шумова В. В., Василяк Л. М., 2024

место его расположения в объеме плазмы, зависят от распределения потенциала внутри облака, образованного результирующей силой, представляющей сумму радиальных сил различной природы, действующих на микрочастицу [12–18]. В разряде постоянного тока, плазма контролируется диффузией и дрейфом заряженных частиц к стенке разряда. В этом случае, наиболее значимое воздействие на микрочастицу оказывают термофоретическая сила (пропорциональная градиенту температуры  $\nabla T$  и квадрату диаметра микрочастицы  $d^2$ ) и силы амбиполярного электрического поля (пропорциональная заряду микрочастицы  $q$ ) и ионного увлечения (пропорциональная  $d$ ). В такой ситуации, очевидно, что можно осуществить управление облаком посредством термофоретической силы, при изменении  $\nabla T$  в тепловом поле плазмы разряда. Такое управление было осуществлено путём изменения температуры стенки [9, 12, 18, 19].

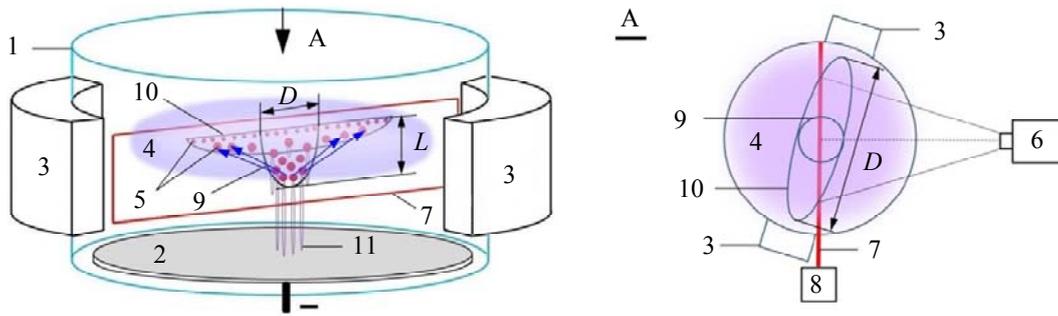
При параметрах разряда, оптимальных для проведения технологического процесса, облако и микрочастицы внутри облака могут находиться в динамически устойчивом и неустойчивом состояниях [20, 21]. Неустойчивые состояния в комплексной плазме разряда постоянного тока характеризуются развитием пылевых волн, вынужденных колебаний микрочастиц по эллиптическим траекториям [15, 21], или автоколебаний частиц по различным траекториям в направлении стенки разрядного устройства [21]. Применительно к технологиям с комплексной плазмой, в ряде случаев, колебания и вращения микрочастиц могут быть полезны с точки зрения реализации однородного воздействия на поверхность микрочастиц [8]. В других случаях, колебания микрочастиц с большой амплитудой могут удалять их из зоны эффективного протекания плазмохимических реакций в теньевые зоны реактора, тем самым понижая эффективность плазмохимических процессов. С этой точки зрения бесконтактное управление плазменной ловушкой с облаком микрочастиц и подавление излишнего движения микрочастиц важно для развития технологий.

В предлагаемом исследовании ставилась задача получить режимы разряда, при которых возбуждаются колебания микрочастиц с

большой амплитудой, траектории которых выходят за границы устойчивого облака, осуществить подавление этих колебаний и реализовать управление облаком с помощью термофоретической силы путем изменения теплового поля в объеме плазмы, где расположено облако.

### Описание эксперимента

Схема эксперимента приведена на рисунке 1. Разряд зажигался в стеклянной, вертикально расположенной, разрядной трубке (РТ) с разными внутренними радиусами  $R$  в верхней и нижней её части при давлениях воздуха  $p = 0,1–0,5$  Торр и токах разряда  $I = 0,25–1$  мА. В нижней части РТ ( $1$ ) длиной 8 см с  $R = 2,5$  см располагался плоский катод ( $2$ ) радиусом 2,1 см (рис. 1). В верхней части РТ длиной 20 см с  $R = 0,8$  см располагался полый анод, через который производилась инжекция твердых диэлектрических полидисперсных ( $d = 3–10$  мкм) микрочастиц в разряд и напуск газа. Переменный диаметр РТ позволял вести исследования плазмы разряда с разным значением  $pR$ . Изменение радиального градиента температуры в плазме регулировалось температурой стенки РТ. Необходимая температура стенки, достигалась при охлаждении двумя элементами Пельтье ( $3$ ), которые соосно помещались на стенку напротив облака микрочастиц. Длина охлаждения стенки РТ вдоль оси разряда составляла 2,5 см и 2 см – вдоль её радиуса. Охладители снабжались системой отвода тепла с водяным теплоносителем. Температура стенки до охлаждения и после выключения охлаждения была равна температуре охлаждающей воды. В эксперименте регистрировалось интегральное свечение плазмы разряда ( $4$ ) и динамика микрочастиц ( $5$ ) видеокамерой ( $6$ ) в процессе изменения теплового поля. Изображения микрочастиц регистрировались в отражённом свете плоского луча ( $7$ ) лазера ( $8$ ) излучающего в красной области спектра. При обработке результатов эксперимента определялись максимальные аксиальные  $L$  и радиальные  $D$  размеры облака и длина треков микрочастиц.



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 – стеклянная разрядная трубка, 2 – катод, 3 – охладители, 4 – свечение страты, 5 – микрочастицы, 6 – видеокамера, 7 – луч лазера, 8 – лазер, 9 – форма облака до охлаждения, 10 – форма облака при охлаждении, 11 – траектории движения крупных микрочастиц при колебаниях,  $L$  – аксиальный и  $D$  – радиальный размеры облака. Синие стрелки показывают направления движений крупных микрочастиц при охлаждении

## Результаты эксперимента и обсуждение

Облака микрочастиц ((9) и (10) на рис. 1) наблюдались в светящихся стратах электрического разряда. В страте электростатическая плазменная ловушка для заряженных микрочастиц образуется при их взаимодействии с продольным и радиальным амбиполярным электрическими полями. В результате неоднородности продольного поля внутри страты наблюдалась сепарация микрочастиц по размерам по высоте страты. Этот результат повторил результаты предыдущих экспериментов, выполненных в разряде в воздухе с полидисперсными микрочастицами [23]. Сепарация микрочастиц по размерам, заключалась в распределении микрочастиц (5) с меньшими размерами в верхних слоях по высоте страты и, соответственно, более крупных микрочастиц – в нижних слоях (рис. 1). Подбором величины давления и тока были выявлены режимы разряда с динамической неустойчивостью микрочастиц в виде вертикальных (продольных) колебаний. Наиболее характерные условия с развитием сильных продольных колебаний микрочастиц обнаружены при понижении давления воздуха в ближайшей к катоду светящейся страте (в широкой области РТ). Наиболее значительные вертикальные колебания ((11) рис. 1) в облаке (во всех режимах разряда с колебаниями микрочастиц) испытывали более крупные микрочастицы, расположенные в нижней части облака. В рассматриваемом случае, вертикальное удержание микрочастицы с массой  $m$  и зарядом  $q$  происходит при уравнивании

силы тяжести  $F_g = mg$  электростатической силой  $F_e = qE$  в аксиальном электрическом поле с напряжённостью  $E$ . Из условия равновесия следует, что наиболее вероятная причина вертикальных колебаний заключается в колебаниях заряда микрочастицы, электрического поля, или обеих этих величин. Подробно природа и причина колебаний микрочастиц в ловушке, образованной в страте электрического разряда, рассмотрена в [20].

Тепловое поле изменялось в объёме плазмы между холодильниками, с аксиальным сечением, примерно равным площади поверхности холодильников (рис. 1). Это сечение перекрывает начальный размер облака. Изменение теплового поля происходило при охлаждении стенки РТ, от температуры  $T_0 = 295$  К до  $T_1 = 273$  К и нагреве, от  $T_1 = 273$  К до  $T_2 = 295$  К. Такое изменение температуры обеспечивает средний градиент температуры превышающий 10 К/см. Отметим, что действие термофоретической силы с такой величиной градиента обеспечивает удержание микрочастицы с массой  $\sim 10^{-10}$  г в вертикальном направлении [9], что в нашем случае соответствует микрочастице диаметром 4 мкм.

Обнаружено, что наибольшее воздействие термофоретической силы испытывают частицы большего размера, расположенные в нижней части облака, а более мелкие частицы, расположенные в верхней его части, испытывают малозаметные смещения. В процессе понижения температуры стенки РТ (увеличении  $\nabla T$ ) наблюдалось (см. рис. 1):

– увеличение радиального размера облака  $D$  (в направлении градиента температуры);

- уменьшение аксиального размера облака  $L$  (в направлении продольного электрического поля);
- движение крупных частиц в направлении стенки РТ в нижние области изменяющегося облака (показаны стрелками);
- уменьшение колебаний микрочастиц (II) в новом пространственном положении облака (I0);
- увеличение интенсивности свечения плазмы в области страты в направлении перераспределения микрочастиц.

При обратном процессе (после выключения охлаждения) происходит увеличение температуры стенки РТ от  $T_1$  до  $T_2$ , что приводит к уменьшению градиента температуры. В этом случае наблюдается обратная картина развития динамических процессов. Микрочастицы большего размера возвращаются в первоначальное (до включения охлаждения) положение (нижнюю часть страты), а облако и свечение страты принимают первоначальный вид. Факт перераспределения интенсивности свечения страты с изменением формы облака связан со значительными потерями плазмы на микрочастицах, которые компенсируются повышенной ионизацией вблизи и внутри облака [22], поэтому свечение страты, вызванное ионизацией газа, оказывается привязанным к облаку.

На рисунке 2 показано изменение радиальных  $D/D(0)$  и аксиальных размеров  $L/L(0)$  облака в процессе охлаждения стенки (увеличения  $\nabla T(I)$ ) и в процессе нагрева стенки (уменьшения  $\nabla T(II)$ ), где  $D(0)$  и  $L(0)$  соответствуют начальным значениям размеров облака до изменения теплового поля (момент времени  $t_0 = 0$ ). Кривые (прерывистые линии), проходящие через точки, соответствующие переменным значениям  $D(t)/D(0)$  и  $L(t)/L(0)$ , получены аппроксимацией экспериментальных данных полиномом второй степени (параболой). В первом приближении, время изменения относительных размеров облака можно сопоставить времени изменения  $\nabla T$ . Момент времени  $t_1$  выхода кривых в области (I) на постоянное значение и момент времени  $t_2$ , соот-

ветствующий достижению относительных размеров облака начальных значений (равных единице при  $t_0$  и  $t_2$ ) в области (II), можно соотнести с достижением температуры стенки значений 273 К и 295 К, соответственно.

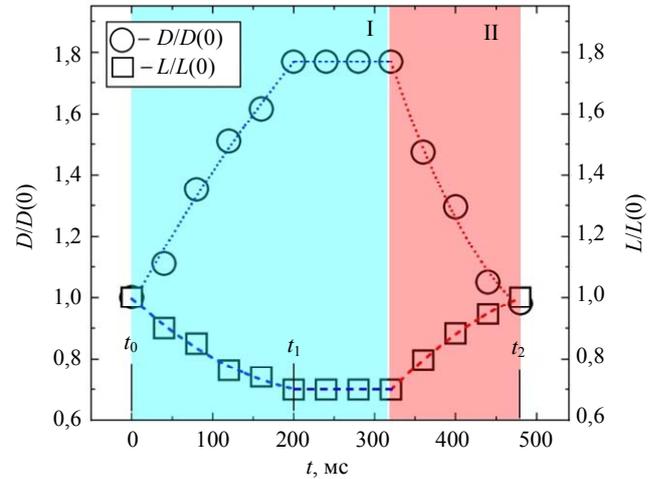
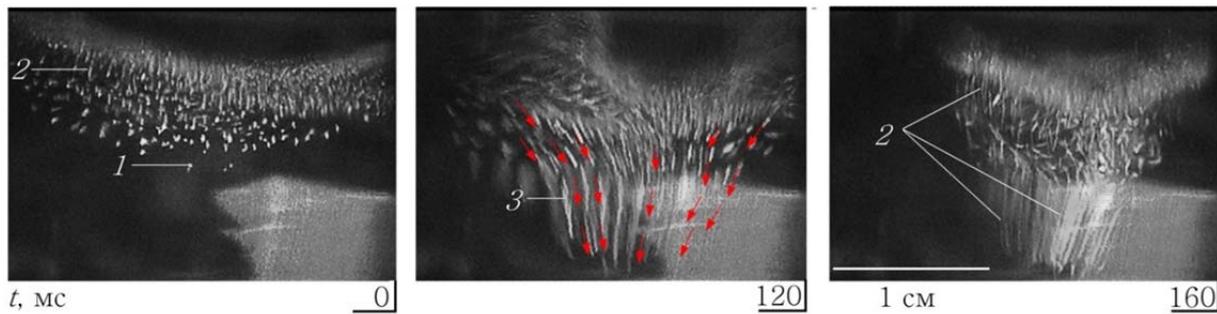


Рис. 2. Относительные радиальные  $D/D(0)$  и аксиальные  $L/L(0)$  размеры облака микрочастиц в зависимости от времени  $t$  при изменении температуры стенки разрядной трубки в процессе: охлаждения – область I (выделена голубым) и нагрева – область II (выделена красным). Прерывистые линии – аппроксимации данных; синие при охлаждении и красные при нагреве. Моменты времени  $t_0$ ,  $t_1$  и  $t_2$  соотнесены температурам стенки  $T_0 = 295$  К,  $T_1 = 273$  К и  $T_2 = 295$  К

Следует обратить внимание, что вид полученных зависимостей на рисунке 2 коррелирует с зависимостью размера облака от тока разряда [23]. В обоих случаях значениям на оси абсцисс можно поставить в соответствие величину термофоретической силы. В рассматриваемом случае – каждому моменту времени процесса, а в другом случае – величине тока  $I$ , от которого зависело распределение температуры газа в радиальном сечении плазмы. Эти соответствия указывают на справедливость построения моделей расчёта комплексной плазмы, учитывающих значительную роль термофоретической силы при формировании ловушки в условиях тепловыделения в плазме электрического разряда [17].

На рисунке 3 приведены последовательные видеок cadры, иллюстрирующие вид пылевого облака и динамику отдельных микрочастиц ( $I$ ) при отключении охлаждения.



**Рис. 3.** Последовательные видеокадры (частота следования кадров 25 fps в режиме автоэкспозиции) облака микрочастиц после выключения охлаждения: 1 – микрочастица, 2 – треки микрочастиц при колебании, 3 – треки микрочастиц при однонаправленном движении. Стрелками обозначено направление движения микрочастиц

Первый ( $t = 0$ ) фрагмент соответствует начальному моменту роста температуры стенки РТ от значения  $T_1 = 273$  К, а последний ( $t = 160$  мс), соответственно, состоянию с конечным установившимся размером облака при температуре  $T_2 = 295$  К. Стрелками показаны направления перемещения частиц, движения которых сопоставляются трекам (2 и 3), где (2) показывают колебания. Из рисунка видно, что микрочастицы большего размера занимают первоначальное (до включения охлаждения) положение в нижней части страты и облако микрочастиц принимает первоначальный вид. В нижней области облака повторно развиваются вертикальные колебания микрочастиц. Амплитуда этих колебаний может быть оценена по длине их треков (2). На последнем фрагменте видно, что более крупные микрочастицы, колеблясь с амплитудой  $A_0$ , покидают облако на длину, превышающую продольный размер облака  $L_0$ . Первый фрагмент убедительно показывает высокую эффективность подавления колебаний крупных микрочастиц с амплитудой  $A_{th}$  в новой ловушке в результате охлаждения. В эксперименте получено весьма значительное, связанное с охлаждением, демпфирование колебаний крупных микрочастиц с отношением  $A_0/A_{th} \approx 20$ . Если провести аналогию между полученным демпфированием колебаний и свободными колебаниями с затуханием, то декремент затухания полученных колебаний будет иметь весьма высокую величину  $\delta = \ln[A_0/A_{th}] \approx 3$ .

### Заключение

Изучено воздействие термофоретической силы на динамику полидисперсных заряженных микрочастиц в плазме разряда постоянного тока при изменении градиента теплового поля. В эксперименте микрочастицы формировали облака в плазме светящихся страт разряда. Наблюдалась сепарация пылевых частиц по размерам по высоте страт. Обнаружено, что увеличение радиального градиента температуры приводит к смещению облака в направлении градиента, увеличивая его радиальный и уменьшая аксиальный размеры. При уменьшении градиента наблюдается обратная последовательность процессов. Обнаружено, что наибольшее воздействие термофоретической силы испытывают частицы большего размера. Совместно с изменением области расположения облака микрочастиц происходит перераспределение интенсивности свечения страты, которое вызвано значительными потерями плазмы на микрочастицах и дополнительной ионизацией. Обнаружено демпфирование колебаний микрочастиц при увеличении градиента теплового поля и получена оценка его эффективности.

Результаты работы могут быть использованы в технологиях с комплексной плазмой.

Работа выполнена при поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации (государственное задание  
№ 075-00270-24-00).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pustyl'nik M. Y. et al. / Contrib. Plasma Phys. 2021. Vol. 61. P. 202100126.
2. Adamovich I. et al. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2022. Vol. 55. P. 373001.
3. Boufendi L., Jouanny M. Ch., Kovacevic E., Berndt J., Mikikian M. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. P. 174035.
4. Karasev V. Yu., Dzlieva E. S., Gorbenko A. P., Masheka I. Ch., Polishchuk V. A., Mironova I. I. / Tech. Phys. 2017. Vol. 62. 3. P. 496–498.
5. Semenov A. V., Pergament A. L., Scherbina A. I., Pikalev A. A. / Plasma Phys. Rep. 2018. Vol. 44. № 4. P. 458–461.
6. Snyders R., Hegemann D., Thiry D., Zabeida O., Klemberg-Sapieha J., Martinu L. / Plasma Sources Sci. Technol. 2023. Vol. 32. P. 074001.
7. Kersten H., Thieme G., Frohlich M., Bojic D., Tung D. H., Quaas M., Wulff H., Hippler R. / Pure Appl. Chem. 2005. Vol. 77. № 2. P. 415–428.
8. Vasilyak L. M., Vasil'ev M. N., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. / Tech. Phys. Lett. 2005. Vol. 31. № 10. P. 827–829.
9. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Zimmukhov V. S., Polyakov D. N., Fortov V. E. / J. Exp. Theor. Phys. 2003. Vol. 96. № 3. P. 436–439.
10. Arp O., Block D., Klindworth M., Piel A. / Phys. Plasmas. 2005. Vol. 12. P. 122102.
11. Fung F., Usatyuk M., DeSalvo B. J., Chin C. / Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 110. P. 034102.
12. Jellum G. M., Daugherty J. E., Graves D. B. / J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. № 10. P. 6923–6934.
13. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. / Russ. J. Phys. Chem. B. 2020. Vol. 14. № 4. P. 666–669.
14. Shumova V. V., Polyakov D. N., Mataybaeva E. K., Vasilyak L. M. / Phys. Lett. A. 2019. Vol. 383. P. 125853.
15. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. / Plasma Sources Sci. Technol. 2017. Vol. 26. P. 08LT01.
16. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. / Plasma Phys. Rep. 2019. Vol. 45. № 3. P. 285–288.
17. Tian R. et al. / Plasma Sci. Technol. 2023. Vol. 25. P. 095401.
18. Balabanov V. V., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Nefedov A. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. / J. Exp. Theor. Phys. 2001. Vol. 92. № 1. P. 86–92.
19. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. / J. Exp. Theor. Phys. 2005. Vol. 100. № 5. P. 1029–1034.
20. Piel A., Melzer A. / Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. Vol. 44. P. R1–R26.
21. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. / Plasma Sources Sci. Technol. 2022. Vol. 31. P. 074001.
22. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. / Plasma Sources Sci. Technol. 2021. Vol. 30. P. 07LT01.
23. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. / Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. P. 065017.

PACS: 52.27.Lw; 52.50.Nr.

## Damping of vibrations of charged microparticles in the thermal field in a glow discharge plasma

*D. N. Polyakov<sup>1</sup>, V. V. Shumova<sup>1,2</sup> and L. M. Vasilyak<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences  
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: cryolab@ihed.ras.ru

<sup>2</sup> N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences  
4 Kosygina st., Moscow, 119991, Russia

*Received 12.07.2024; revised 2.08.2024; accepted 7.08.2024*

***It has been experimentally shown that by the thermophoretic force acting in the thermal field on microparticles in a complex plasma, it is possible to effectively control a cloud of charged microparticles, which is formed in an electrostatic trap in the stratum of a positive glow discharge column. It is found that changing the temperature gradient of the thermal field leads to changes in the location of the cloud in the plasma volume, change the shape and size of the cloud, and to suppression of microparticle oscillations in directions transverse to this gradient. It is found that stronger thermal effects are experienced by larger-sized microparticles, and the damping of microparticle vibrations occurs in conjunction with changes in the spatial location***

*of the cloud. The experimental results obtained are consistent with the theoretical concepts of the phenomena under consideration.*

*Keywords:* complex plasma, charged microparticles, glow discharge, microparticle cloud, oscillations, thermophoretic force.

## REFERENCES

1. Pustyl'nik M. Y. et al., *Contrib. Plasma Phys.* **61**, 202100126 (2021).
2. Adamovich I. et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55**, 373001 (2022).
3. Boufendi L., Jouanny M. Ch., Kovacevic E., Berndt J. and Mikikian M., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 174035 (2011).
4. Karasev V. Yu., Dзлиeva E. S., Gorbenko A. P., Masheka I. Ch., Polishchuk V. A. and Mironova I. I., *Tech. Phys.* **62** (3), 496–498 (2017).
5. Semenov A. V., Pergament A. L., Scherbina A. I. and Pikalev A. A., *Plasma Phys. Rep.* **44** (4), 58–461 (2018).
6. Snyders R., Hegemann D., Thiry D., Zabeida O., Klemberg-Sapieha J. and Martinu L., *Plasma Sources Sci. Technol.* **32**, 074001 (2023).
7. Kersten H., Thieme G., Frohlich M., Bojic D., Tung D. H., Quaas M., Wulff H. and Hippler R., *Pure Appl. Chem.* **77** (2), 415–428 (2005).
8. Vasilyak L. M., Vasil'ev M. N., Vetchinin S. P., Polyakov D. N. and Fortov V. E., *Tech. Phys. Lett.* **31** (10), 827–829 (2005).
9. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Zimnukhov V. S., Polyakov D. N. and Fortov V. E., *J. Exp. Theor. Phys.* **96** (3), 436–439 (2003).
10. Arp O., Block D., Klindworth M. and Piel A., *Phys. Plasmas.* **12**, 122102 (2005).
11. Fung F., Usatyuk M., DeSalvo B. J. and Chin C., *Appl. Phys. Lett.* **110**, 034102 (2017).
12. Jellum G. M., Daugherty J. E. and Graves D. B., *J. Appl. Phys.* **69** (10), 6923–6934 (1991).
13. Shumova V. V., Polyakov D. N. and Vasilyak L. M., *Russ. J. Phys. Chem. B.* **14** (4), 666–669 (2020).
14. Shumova V. V., Polyakov D. N., Mataybaeva E. K. and Vasilyak L. M., *Phys. Lett. A.* **383**, 125853 (2019).
15. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 08LT01 (2017).
16. Shumova V. V., Polyakov D. N. and Vasilyak L. M., *Plasma Phys. Rep.* **45** (3), 285–288 (2019).
17. Tian R. et al., *Plasma Sci. Technol.* **25**, 095401 (2023).
18. Balabanov V. V., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Nefedov A. P., Polyakov D. N. and Fortov V. E., *J. Exp. Theor. Phys.* **92** (1), 86–92 (2001).
19. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N. and Fortov V. E., *J. Exp. Theor. Phys.* **100** (5), 1029–1034 (2005).
20. Piel A. and Melzer A., *Plasma Phys. Control. Fusion.* **44**, R1–R26 (2002).
21. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., *Plasma Sources Sci. Technol.* **31**, 074001 (2022).
22. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., *Plasma Sources Sci. Technol.* **30**, 07LT01 (2021).
23. Polyakov D. N., Shumova V. V. and Vasilyak L. M., *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**, 065017 (2019).