

# Траектории заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке с потенциалом прямоугольной формы

М. С. Доброклонская, В. Я. Печеркин, В. И. Владимиров и Л. М. Василяк  
Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва  
125412, Россия

E-mail: vpecherkin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 4 ноября 2024 г.

**Аннотация.** Впервые экспериментально и численным расчетом получены траектории заряженных частиц микронного размера в линейной квадрупольной ловушке со знакопеременным потенциалом в виде периодических импульсов прямоугольной формы с различным коэффициентом заполнения положительной полярностью. Траектории рассчитаны путем численного решения уравнения Ланжевена для конкретных значений заряда и размера частицы. Обнаружено, что при уменьшении или увеличении коэффициента заполнения, вблизи значения 50% траектории движения удерживаемых в ловушке частиц существенно отличаются от траекторий движения частиц в ловушке с гармонической формой напряжения. При увеличении коэффициента заполнения траектории частиц проходят вблизи диагонали квадрата перпендикулярного сечения ловушки. При уменьшении коэффициента заполнения менее 50% или при его увеличении более 50% меняется диагональ наклона траектории микрочастиц и возрастает размах траектории вдоль диагонали в поперечном сечении ловушки. Вид и изменение направления траекторий, полученные в расчетах, согласуются с результатами экспериментов. <https://doi.org/10.33849/2024308>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой интерес представляют кулоновские системы заряженных пылевых частиц, как в плазменных ловушках (пылевая плазма), так и в электродинамических ловушках без плазменного экранирования. Пылевая (или комплексная) плазма относится к особому классу низкотемпературной плазмы низкого давления, содержащей, наряду со свободными электронами, ионами, нейтральными молекулами, твердые частицы (пылевые частицы) нанометрового или микрометрового размера [1–3]. Потенциальные ловушки могут создаваться электрическими разрядами низкого давления в областях неоднородного электрического поля и могут быть сформированы в приэлектродном слое емкостного радиочастотного разряда или в стратах положительного столба тлеющего разряда [1, 2]. Заряд частиц достигает величины, составляющей несколько тысяч зарядов электронов, и определяется электронной температурой и размером частиц. Если потенциальная энергия кулоновского взаимодействия заряженных пылевых частиц значительно превышает их кинетическую энергию, то они могут образовывать упорядоченные структуры, которые называются кулоновскими или плазменными кристаллами. Исследования механизмов взаимодействия микрочастиц с плазмой необходимы для построения конфигураций разряда, которые были бы способны моделировать структуры конденсированных сред, а также, при интерпретации экспериментов, отличать плазменные явления от общих физических явлений конденсированных сред [4]. Результаты таких исследований могут быть использованы для моделирования свойств кристаллов, жидкостей и коллоидных суспензий [5–8].

Электродинамические ловушки получили широкое применение в качестве эффективного устройства для захвата и удержания нано- и микрочастиц в вакууме и при атмосферном давлении в газовой среде. В настоящее время электродинамические ловушки являются основным инструментом в масс-спектрометрии для изучения элементного состава микроструктур, спектральных

свойств одиночных микрочастиц, атомарных и молекулярных ионов и исследования ионных реакций [9]. Такой подход позволяет различать индивидуальные особенности отдельных частиц и исследовать физические процессы, происходящие как в объеме, так и на их поверхности [10]. Линейные электродинамические ловушки позволяют создавать и исследовать кулоновские структуры с большим количеством частиц при атмосферном давлении [11–13], определять их свойства [14–16], создавать генерацию уединенных волн плотности и исследовать их свойства [17], осуществлять селекцию и сепарацию полидисперсных смесей частиц по размерам [18], проводить бесконтактную очистку различных поверхностей [19], измерять заряды одиночных частиц [20].

Новым направлением применения ловушек может быть оперативное определение размеров и заряда частиц по траекториям движения в воздухе [21, 22], а также исследование хаотических движений частиц, которые могут возникать из простых колебаний [23]. Поведение кулоновских систем и отдельных микрочастиц в квадрупольной линейной ловушке хорошо изучено для гармонической формы удерживающего напряжения. В предыдущей работе [24] мы впервые применили прямоугольный потенциал для удержания заряженных микрочастиц в воздухе при атмосферном давлении, провели сравнение удержания заряженных диэлектрических частиц микронного размера в ловушке при гармоническом и знакопеременном импульсно-периодическом напряжении прямоугольной формы и обнаружили, что частицы лучше удерживаются при прямоугольном потенциале. Для гармонического напряжения для воздействия на удерживаемые частицы можно изменять только амплитуду и частоту, а в случае импульса напряжения прямоугольной формы дополнительными изменяемыми параметрами являются: разные длительности положительного и отрицательного импульса при сохранении общей длительности периода постоянной, а также разные амплитуды импульсов положительной и отрицательной полярности.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование и компьютерное моделирование траекторий заряженных частиц для различных значений коэффициента заполнения положительной полярности импульса напряжения прямоугольной формы.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема эксперимента приведена на рисунке 1 и аналогична использованной нами ранее в работе [22]. Линейные электроды ловушки из стали диаметром 4 мм и длиной рабочей части электродов 10 см закреплены в углах квадрата со стороной 2 см. К парам диагональных линейных электродов прикладывается импульсно-периодическое знакопеременное напряжение прямоугольной формы с частотой 50 Гц и регулируемой амплитудой до 10 кВ. Генератор импульсов позволяет регулировать коэффициент заполнения импульсов положительной полярности  $K_p$ .

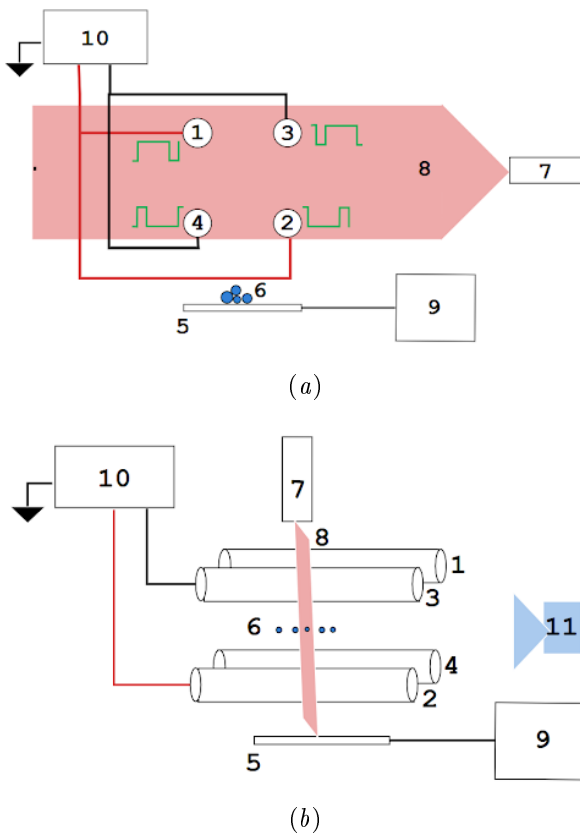
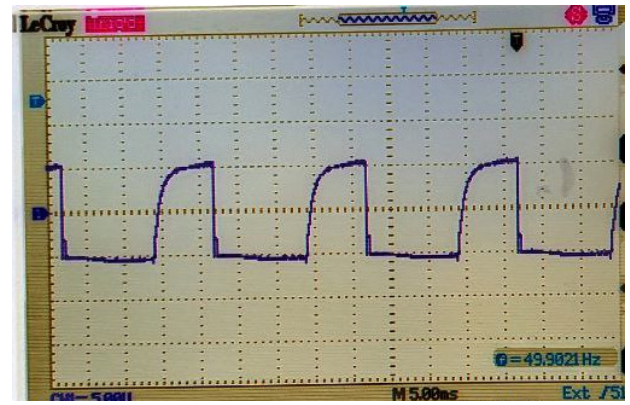
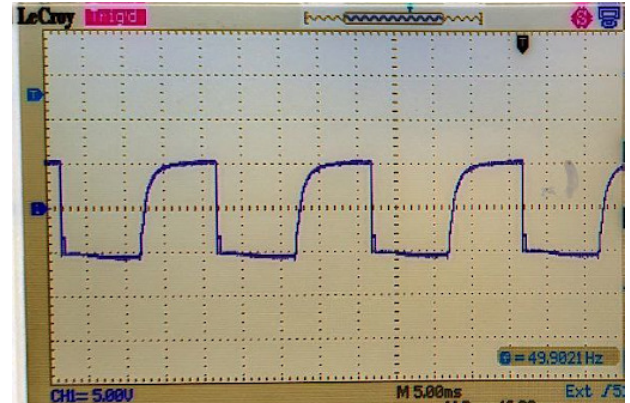


**Рисунок 1.** Схема эксперимента. 1–4 — линейные электроды, 5 — металлическая пластина для зарядки частиц, 6 — заряженные микрочастицы, 7 — лазер, 8 — плоский лазерный луч, 9 — высоковольтный источник для зарядки частиц, 10 — генератор высоковольтных импульсов, 11 — видекамера. (a) — вид с торца электродов ловушки, (b) — вид сбоку.

Осциллограммы прямоугольного импульса напряжения на электродах ловушки при коэффициенте заполнения  $K_p$ , равном 40% и 50%, приведены на рисунке 2. Регистрация частиц и траекторий их движения производилась цифровой видекамерой марки iDS uEye с торца ловушки. Ось камеры была направлена вдоль оси ловушки. Подсветка частиц осуществлялась плоским лазерным лучом (лазерным ножом)



(a)



(b)

**Рисунок 2.** Осциллограммы напряжения на электродах ловушки при  $K_p$ : (a) — 40%; (b) — 50%.

толщиной 2 мм в области наблюдения на длине волны 532 нм. Мощность излучения лазера составляла 300 мВт. Изначально ловушка заполняется частицами при  $K_p = 50\%$ . Затем коэффициент заполнения изменяется в сторону уменьшения или увеличения.

## 3. РАСЧЕТ

Физические параметры модели подобраны в соответствии с реальной экспериментальной установкой. Размер частицы для расчета выбран 10 микрон, величина отрицательного заряда частицы составляла 45000 зарядов электрона. Начальное положение частицы в ловушке задавали в центре квадрата поперечного сечения, в точке с координатами (0,0), начальная скорость равна нулю. Траектории частиц были построены на основе численного решения уравнения Ланжевена  $m\mathbf{a} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_s$ , где  $\mathbf{F}_e$  — сила электрического поля ловушки,  $\mathbf{F}_g$  — сила гравитации,  $\mathbf{F}_f$  — сила трения частицы о воздух,  $\mathbf{F}_s$  — стохастический член, обусловленный столкновениями с молекулами воздуха. Сила трения  $\mathbf{F}_f$  задана формулой Стокса  $\mathbf{F}_f = -6\pi\mu r\mathbf{v}$ , где  $r$  — радиус частицы,  $\mu$  — вязкость воздуха,  $\mathbf{v}$  — скорость частицы. Воздух в ловушке неподвижен.

Результаты расчета траекторий частиц при разных коэффициентах заполнения прямоугольного импульса представлены на рисунках 3–6(a). Изображен квадрат поперечного сечения ловушки. Поскольку размах траекторий мал по сравнению с межэлектродным расстоянием ловушки, рисунки — это приближенные траектории

частицы, в увеличенном масштабе. Для случаев когда частицы достигают устойчивого состояния, финальная устойчивая траектория выделена жирной черной линией. Программа расчета автоматически учитывает скорости частиц и время, за которое получена траектория. Изменение скорости частиц на рисунках 3–6(а) соответствует цветовой шкале справа от рисунка, размерность шкалы метр в секунду. Время, за которое получена траектория, указано при описании результатов расчетов. Стрелки на рисунках показывают направление силовых линий электрического поля между электродами. Сплошные линии — распределение потенциала.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 3(а,б) представлены траектории частиц в поперечном сечении при заполнении импульса 50%, полученные при моделировании и из эксперимента, соответственно. Поперечное сечение перпендикулярно осям линейных электродов ловушки (см. рисунок 1). При коэффициенте заполнения 50% частицы колеблются вдоль силовых линий, меняя направление каждые полпериода при смене полярности напряжения на электродах. Из рисунков 3(а,б) видно, что под действием силы тяжести частицы опускаются ниже центральной оси ловушки. На рисунке 3(а) видно, что при захвате частицы ловушкой наблюдается переходная область траектории колебаний частицы, которая заканчивается через 10 периодов, и дальнейшие колебания осуществляются по устойчивой траектории. Аналогичные устойчивые колебания наблюдаются в эксперименте, рисунок 3(б). Также на рисунке 3(б) видно, что траектории полидисперсных частиц могут отличаться длиной траектории и направлением, что объясняется разницей в размерах и зарядах частиц.

Траектории, полученные для  $K_p = 35\%$ , представлены на рисунке 4(а,б). Траектории проходят вдоль одной диагонали, от верхнего правого угла ловушки к нижнему левому.

На рисунке 4(а) с результатами моделирования хорошо видно влияние силы гравитации и силы трения — частица устойчиво колеблется только от центра к нижнему электроду, при этом каждый следующий виток лежит ниже предыдущего. Частица достигает устойчивого состояния за 4 периода, что быстрее, чем на рисунке 3(а), и витки траекторий расположены плотнее друг к другу. Из эксперимента, на рисунке 4(б) видно, что частицы разных размеров и зарядов устойчиво колеблются вдоль диагонали на разном удалении от центра ловушки и под разным углом к диагонали, что объясняется полидисперсностью частиц. Несмотря на различие в размерах и зарядах частиц, все частицы колеблются вдоль диагонали, в соответствии с расчетом для одной частицы.

Результаты при  $K_p = 60\%$  представлены на рисунках 5(а,б). Движение частиц для этого случая происходит вдоль другой (перпендикулярной) диагонали, и траектории расположены вдоль этой диагонали, от верхнего левого электрода к нижнему правому. На рисунке 5(а) с рассчитанной траекторией видно, как после падения из центра ловушки под действием силы гравитации, частица сперва отклоняется к диагонали с противоположным коэффициентом заполнения, но затем возвращается на перпендикулярную диагональ и далее

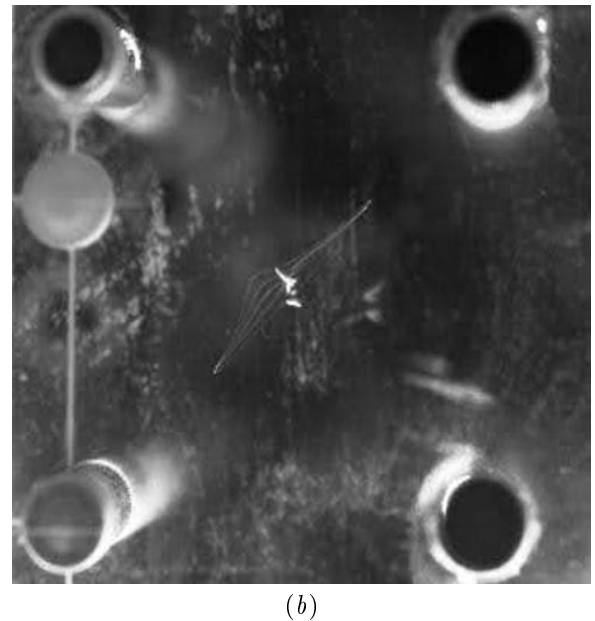
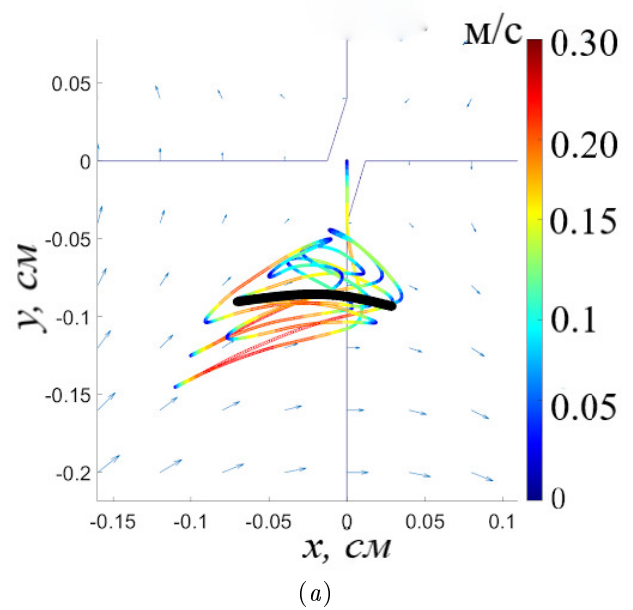


**Рисунок 3.** Траектории заряженных частиц при  $K_p = 50\%$ . Синие стрелки — направление силовых линий электрического поля между электродами. Сплошные линии — распределение потенциала в области рисунка. (а) — расчет, (б) — эксперимент.

траектория развивается вдоль этой диагонали вследствие большей длительности воздействия силы электрического поля ловушки на частицу. На рисунке 5(б) видны полученные в эксперименте различные траектории частиц. Колебания частиц происходят вдоль той же диагонали, что и в расчете на рисунке 5(а). Траектории различаются вследствие полидисперсности частиц, как и траектории, представленные на рисунке 3 и рисунке 4.

Для сравнения, на рисунках 6(а,б) приведены результаты расчета и эксперимента для синусоидального напряжения с частотой 50 Гц, амплитуда и частота которого соответствует амплитуде и частоте прямоугольного импульса напряжения с  $K_p = 50\%$ . Расчет проведен при тех же параметрах частицы, что и для прямоугольного импульса. На рисунке 6(а) из расчета видно, что

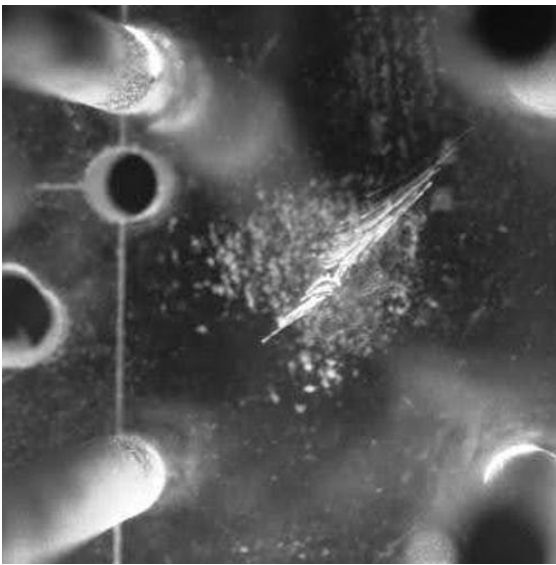
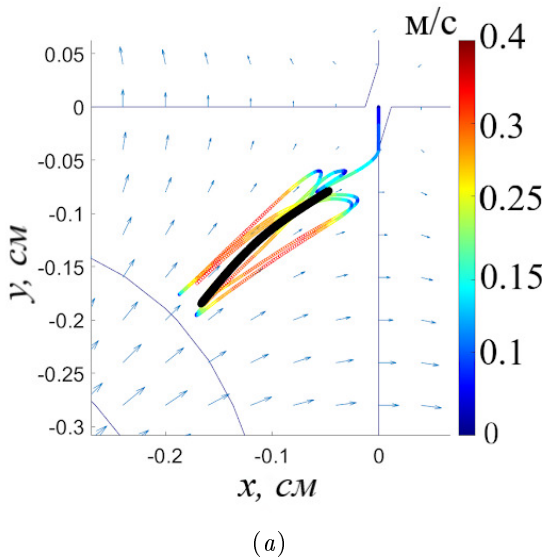


**Рисунок 4.** Траектории частиц при  $K_p = 35\%$ . Синие стрелки — направление силовых линий электрического поля между электродами. Сплошные линии — распределение потенциала в области рисунка. (a) — расчет, (b) — эксперимент.

траектория движения частицы циклически развивается по квадрату. Каждые полпериода меняется направление движения и каждый следующий виток ниже предыдущего и его амплитуда меньше. На рисунке 6(б) представлены экспериментально полученные изображения траекторий для полидисперсных частиц. Можно заключить, что при синусоидальном напряжении траектории похожи на контур квадрата с вогнутыми стенками. Траектории различаются вследствие полидисперсности частиц. Отметим, что при гармоническом напряжении нет возможности регулировать длительность положительных и отрицательных полувольт.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы траектории движения заряженных частиц микронного размера в линейной квадрупольной ловушке в воздухе с новой формой потенциала в ви-

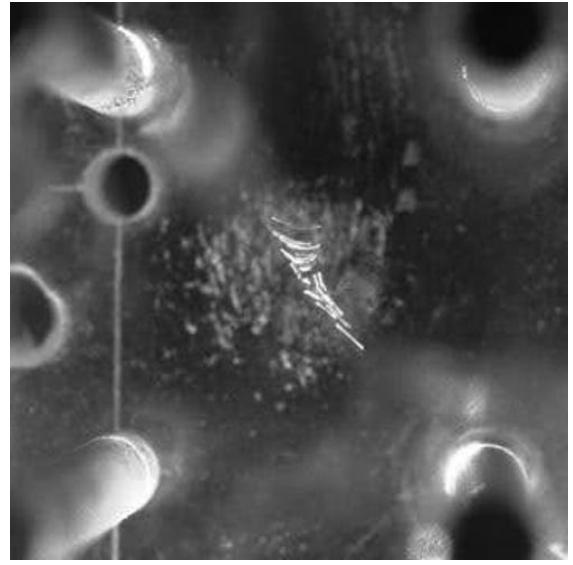
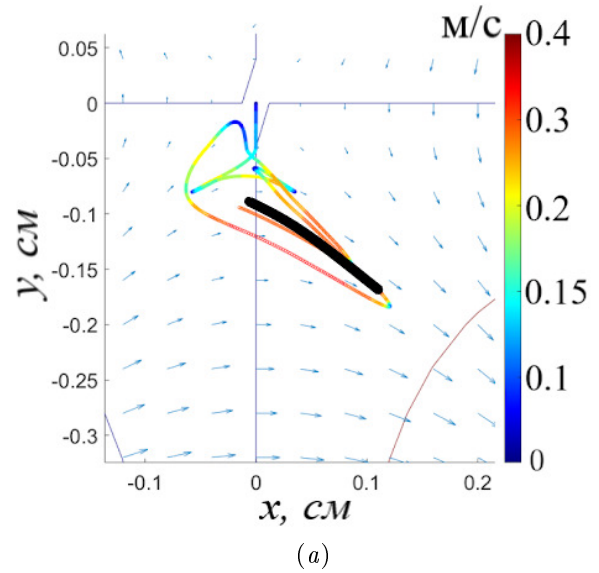


**Рисунок 5.** Траектории частиц при  $K_p = 60\%$ . Синие стрелки — направление силовых линий электрического поля между электродами. Сплошные линии — распределение потенциала в области рисунка. (a) — расчет, (b) — эксперимент.

де прямоугольных знакопеременных периодических импульсов на линейных электродах ловушки. Для прямоугольного потенциала возрастает количество параметров, которые можно изменять для воздействия на удерживаемые одиночные частицы и кулоновские системы, состоящие из большого количества частиц. Для гармонического напряжения можно изменять только амплитуду и частоту, а в случае прямоугольной формы напряжения дополнительными изменяемыми параметрами являются: разные длительности положительного и отрицательного импульса при постоянной общей длительности периода; разные амплитуды импульсов положительной и отрицательной полярности; создание паузы с нулевым потенциалом и комбинация этих способов. Экспериментально и численно получены формы траекторий заряженных диэлектрических частиц микронного размера при прямоугольном импульсном удерживающем напряжении с различными

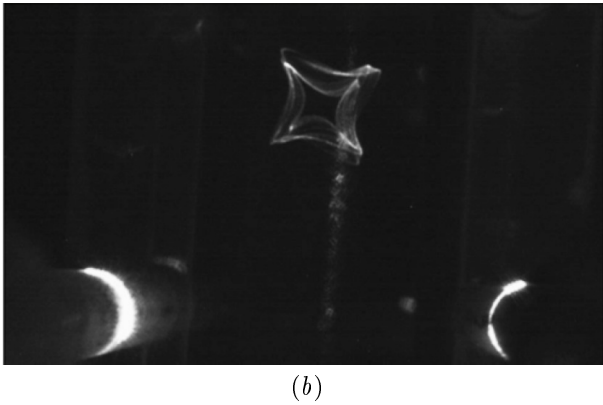
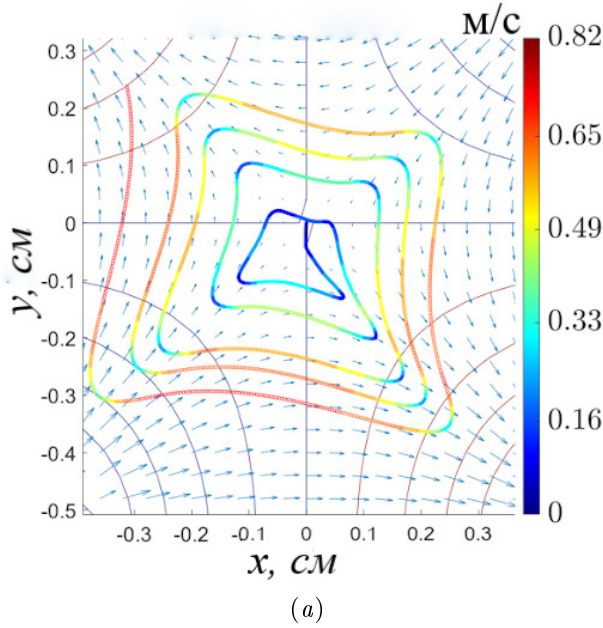


**Рисунок 6.** Траектории частиц при синусоидальном напряжении с частотой 50 Гц. Амплитуда напряжения 3 кВ. Синие стрелки — направление силовых линий электрического поля между электродами. Сплошные линии — распределение потенциала в области рисунка. (a) — расчет, (b) — эксперимент.

коэффициентами заполнения положительной полярности импульса. Показано, что форма траекторий принципиально отличается от траекторий при гармоническом потенциале. Такое существенное отличие можно объяснить двумя причинами. Первая причина — в скорости изменения сигнала. В случае прямоугольного импульса электрическое поле меняет полярность скачком, а при гармоническом сигнале электрическое поле и вид траектории меняется постепенно. Вторая причина — в возможности менять коэффициент заполнения. Заряженная частица притягивается к электродам с потенциалом, противоположным знаку ее заряда и большей длительностью по времени. Поэтому при коэффициентах заполнения, отличающихся от значения 50% движение частиц происходит по траекториям вдоль диагонали, на электродах которой подано напряжение с полярностью, противоположной заряду частицы. При переходе через величину заполнения 50% траектории движения перемещаются на перпендикулярную диагональ. Обнаруженный эффект можно использовать для определения зна-

ка заряда на частицах, для управления одиночными частицами и кулоновскими системами заряженных частиц, для нахождения новых областей устойчивости.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fortov V E and Morfill G E 2010 *Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space* (Boca Raton, FL: Taylor and Francis)
2. Fortov V E, Ivlev A V, Khrapak S A, Khrapak A G and Morfill G E 2005 *Phys. Rep.* **421** 1–103
3. Boufendi L, Jouanny M C, Kovacevic E, Berndt J and Mikikian M 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 174035
4. Pustynnik M Y, Pikalev A A, Zobnin A V, Semenov I L, Thomas H M and Petrov O F 2021 *Contrib. Plasma Phys.* **61**(10) e202100126
5. Ivlev A, Lowen H, Morfill G and Patric Royall C 2012 *Complex Plasmas and Colloidal Dispersions: Particle-Resolved Studies of Classical Liquids and Solids* (Singapore: World Scientific)
6. Fedoseev A V, Salnikov M V, Vasiliev M M and Petrov O F 2024 *Phys. Plasmas* **31** 063703
7. Светлов А С, Кононов Е А, Трухачев Ф М, Васильев М М и Петров О Ф 2023 *ЖЭТФ* **5** **137** 615–621
8. Васильев М М, Алексеевская А А, Косс К Г, Васильева Е В и Петров О Ф 2023 *TBT* **6** **1** 825–829
9. Wester R 2009 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **42** 154001
10. Raino G *et al* 2022 *Nat. Commun.* **13**(1) 2587
11. Syrovatka R A, Vasilyak L M, Deputatova L V, Filinov V S, Lapitsky D S, Pecherkin V Y and Vladimirov V I 2016 *Contrib. Plasma Phys.* **56** 321–326
12. Rudyi S, Vasilyev M, Rybin V and Rozhdestvensky Y 2022 *Int. J. Mass Spectrom.* **479** 116894
13. Mihalcea B M, Filinov V S, Syrovatka R A and Vasilyak L M 2023 *Phys. Rep.* **1016** 1–103
14. Vasilyak L M, Vladimirov V I, Deputatova L V, Lapitsky D S, Molotkov V I, Pecherkin V Y, Filinov V S and Fortov V E 2013 *New J. Phys.* **15** 043047
15. Rybin V, Rudyi S and Kokorina O 2020 *JVE* **32** 156–159
16. Major F G, Gheorghe V N and Werth G 2005 *Charged Particle Traps Physics and Techniques of Charged Particle Field Confinement* (Berlin: Springer)
17. Syrovatka R, Medvedev Y, Filinov V, Vasilyak L, Deputatova L, Vladimirov V and Pecherkin V 2019 *Phys. Lett. A* **383** 338–344
18. Доброклонская М С, Василяк Л М, Владимиров В И, Печеркин В Я и Попов Д И 2023 *Прикладная физика* **3** 39–48
19. Syrovatka R A, Filinov V S, Vasilyak L M, Pecherkin V Y, Deputatova L V, Vladimirov V I, Popel O S and Tarasenko A B 2021 *J. Electrostat.* **112** 103583
20. Syrovatka R A, Deputatova L V, Filinov V S, Lapitsky D S, Pecherkin V Y, Vasilyak L M and Vladimirov V I 2016 *Contrib. Plasma Phys.* **56** 419–424
21. Rybin V, Rudyi S and Rozhdestvensky Y 2022 *Int. J. Non-Linear Mech.* **147** 104227
22. Доброклонская М С, Василяк Л М, Владимиров В И и Я Печеркин В 2023 *Прикладная физика* **2** 29–34
23. Rudyi S, Shcherbinin D and Ivanov A 2024 *J. Nonlinear Sci.* **34**(10) 103140
24. Доброклонская М С, Печеркин В Я, Владимиров В И и Василяк Л М 2024 *Прикладная физика* **3** 93–98