

УДК 53.09; 53.043
EDN: HFGOEI

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty



Устойчивые и неустойчивые траектории движения заряженной частицы в квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе

М. С. Доброклонская, Л. М. Василяк, В. И. Владимиров, В. Я. Печеркин

Представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований пленения одиночной заряженной частицы в горизонтально ориентированной линейной электродинамической ловушке Пауля при атмосферном давлении в воздухе. Получены траектории устойчивого и неустойчивого движения. Обнаружено, что эти два типа траекторий отличаются характером их развития на начальном этапе при захвате частицы ловушкой.

Ключевые слова: заряженные частицы, линейная электродинамическая квадрупольная ловушка, траектории движения, воздух при атмосферном давлении.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-29-34

Введение

Несмотря на то, что ионные ловушки были известны с середины XX-го века, интерес к исследованию удержания заряженных частиц микронных размеров неуклонно растет. Сегодня электродинамические ловушки являются основным компонентом многих проектов мирового значения и научно-технических приложений от прецизионных измерений при разработке атомных часов в микроволновой и оптической области [1], точных навигационных приборов или проектов по реализации квантовых вычислительных схем [2–4].

При атмосферном давлении в воздухе ловушки позволяют исследовать характеристики как отдельных плененных частиц [5] (вплоть до нанометровых масштабов), так и структур с большим количеством заряженных микрочастиц (несколько тысяч частиц) [6], что значимо при изучении кулоновских структур [7, 8], их сжимаемости, распространения в них уединенных волн плотности [9, 10], возникновения неустойчивостей.

В воздухе электродинамические ловушки также могут применяться и для практических целей, таких как, определения заряда частиц [11], очистки различных поверхностей или панелей солнечных элементов [12], очистки газов от частиц заданных размеров. Недавно был предложен метод определения физических свойств частиц (размер, массу и заряд) по траектории движения частицы в электродинамической линейной ловушке Пауля при наличии аккуратного расчета [13].

Основной параметр, который необходим в первую очередь при исследованиях и задачах, это границы области удержания заряженных частиц и облаков заряженных частиц в ловушках. Как правило, при расчетах границ фиксируются параметры (напряжения и час-

Доброклонская Марина Сергеевна, аспирант.
Василяк Леонид Михайлович, гл.н.с., д.ф.-м.н.
Владимиров Владимир Иванович, н.с., к.ф.-м.н.
Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: vpecherkin@yandex.ru
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 13.03.2023
После доработки 28.03.2023
Принята к публикации 4.04.2023

© Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я., 2023

тота электродов ловушки, и отношение заряда частиц к их массе), при которых частицы просто вылетают из ловушки. Такой подход вполне оправдан для электродинамических ловушек в вакууме и позволяет не учитывать такой параметр частиц, как их размер, и ввести параметр отношения заряда к массе. Однако в воздухе необходимо учитывать силу трения, которая в простом виде пропорциональна размеру частицы и вязкости воздуха, поэтому рассчитанные для вакуума границы не будут совпадать с границами для воздуха. В случае воздуха необходимо привлекать дополнительные методы, одним из которых может быть анализ траекторий для определения границ удержания частиц в ловушках. Цель данной работы: проверить такую возможность определения границ удержания, сравнив тра-

ектории устойчивого удержания вброшенной в ловушку частицы и траектории вылета частицы из ловушки на начальном этапе их развития при попадании частицы в ловушку.

Эксперимент

Схема эксперимента с горизонтальной линейной квадрупольной электродинамической ловушкой представлена на рис. 1. Горизонтально расположенные динамические электроды 1 из медных стержней диаметром 4 мм и длиной 300 мм были расположены в вершинах квадрата со стороной 23 мм. На динамические электроды попарно по диагонали подавалось синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц (рис. 1).

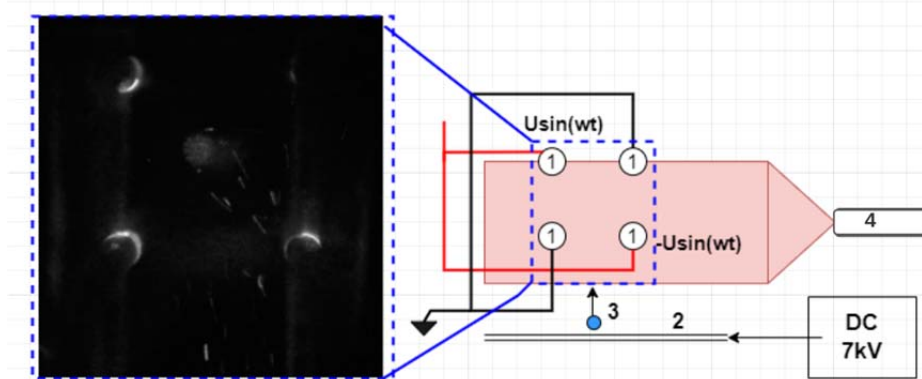


Рис. 1. Фотография торца горизонтальной линейной квадрупольной ловушки (справа) и ее схема (слева). На изображении слева видны торцы электродов ловушки и траектории частиц. 1 – электроды, 2 – зарядная пластина, 3 – микрочастица оксида алюминия, 4 – лазер

Регистрация частиц и траекторий их движения производилась ССД камерой при подсветке лазером 4 с длиной волны 532 нм и мощностью 300 мВт узким плоским лучом (лазерный нож) с шириной около 2 мм. Фоторегистрация с частотой 240 кадров секунду позволила точно измерить скорости влета частиц в ловушку при отрыве их от зарядной пластины 2 (рис. 1). Для фиксирования траекторий движения частиц внутри ловушки, представленных на рис. 2 и рис. 3, фоторегистрация проводилась с частотой 15 кадров в секунду с торца ловушки. Ось камеры располагалась вдоль оси ловушки и перпендикулярно лазерному лучу. При перемещении лазера и камеры можно было наблюдать различные участки в ловушке.

Исследования проводились в воздухе при атмосферном давлении, использовали полидисперсные частицы оксида алюминия Al_2O_3 с размерами от 10–80 мкм. Для сообщения заряда частицам, достаточного для захвата и удержания внутри ловушки [14], использовался метод индукционной зарядки на металлической пластине с потенциалом 7 кВ. Величина потенциала была выбрано экспериментально, т. к. при нем частицы отрывались от зарядной пластины и захватывались ловушкой.

Эксперимент состоит из следующих этапов. На динамические электроды ловушки подается напряжение амплитудой в 10 кВ. Под нижние электроды ловушки на расстояние от 2,5 до 1 см вводится зарядная металли-

ческая пластина с тонким слоем частиц. На пластину постепенно подается постоянное напряжение от 0 до 7 кВ. Часть частиц отрывается от пластины и захватывается ловушкой. Методика определения зарядов частицы описана в [14]. Напряжение на пластине снижается до нуля и пластина извлекается из под нижних электродов. Следует отметить, что при таком методе постепенного увеличения заряда на частицах от зарядной пластины и их отрыве и подлете к ловушке фактически происходит предварительная сепарация заряженных частиц. Далее траектории частиц фиксировались камерой и сопоставлялись с расчетом.

Модель и расчет

Траектории отдельных частиц описываются уравнениями Лагранжа с использованием закона движения Ньютона. Для каждой частицы решается обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка для каждой ее координаты. Закон движения Ньютона требует указания массы частицы и всех сил, действующих на частицу. Межчастичное взаимодействие задается Кулоновским потенциалом, т. к. заряды есть только на микрочастицах. При расчете учитывались силы, обусловленные переменными электрическими полями ловушки F_e , силы гравитации F_g и силы вязкого трения частицы о воздух F_f . Учет стохастической силы F_s , обусловленной столкновениями с молекулами воздуха, приводит к необходимости решения дифференциального уравнения Ланжевена $ma = F_e + F_f + F_s + F_g$, где сила трения частицы о воздух задана формулой Стокса $F_f = -6\pi\mu r v$, где r – радиус частицы, μ – вязкость воздуха, v – скорость частицы, воздух в ловушке неподвижен.

Для разделения основных типов траекторий и нахождения границы развития неустойчивого движения заряженной частицы в ловушке на начальном этапе выполнен расчет, при котором в начальный момент времени заряженная частица либо помещалась в центре ловушки с координатами $x_0 = 0$, $y_0 = 0$ и

начальная скорость частицы принималась равной нулю, либо частица залетала в ловушку снизу с начальной скоростью 0,7–1 м/с. Заряд частицы менялся в диапазоне от 10^4 до 3×10^5 зарядов электрона, что включено в определенный ранее [14] диапазон зарядов для случая индукционной зарядки диэлектрических частиц. Этот расчет выполнен для одиночной частицы оксида алюминия (плотность $3,99 \text{ г/см}^3$) в приближении идеальной сферы с диаметром 20 мкм и массой $1,65 \times 10^{-8} \text{ г}$. Амплитудная величина переменного напряжения на электродах ловушки взята равной 5 кВ при частоте 50 Гц для размера частицы 20 мкм, так как такая частица удерживалась в ловушке при экспериментах.

Получили три различных вида траекторий: быстрый переход к устойчивой траектории захваченной ловушкой частицы (рис. 2), траекторию развития неустойчивости и вылета из ловушки (рис. 3) и промежуточная траектория медленного установления устойчивого движения (рис. 4), когда частице требуется предварительно сузить размах и перейти на устойчивую траекторию. Из расчета получено, что размах такой устойчивой траектории по оси ox от 0,8 мм до 1,5 мм для разных зарядов и размера частицы, что существенно меньше размеров ловушки, поэтому на рис. 3 (справа) и рис. 4 изображения траекторий даны в крупном масштабе.

Результаты и обсуждение

Расчет показал совпадение траекторий и их размах для частиц, достигших устойчивого состояния. В этом состоянии частицы колеблются на оси ловушки длительное время. На рис. 2 слева представлена фотография траектории устойчивого движения одиночной частицы во время эксперимента. Ловушка расположена под углом относительно оси камеры, размах зафиксированной траектории 0,8–1 мм. На рис. 3 справа рассчитанная траектория, размах устойчивого движения 0,8 мм по оси x , устойчивость достигнута всего за 1,5 периода. Скорость частицы на траектории указана цветом: синие отрезки – низкая скорость, красные – скорость растет с насыщением красного. При устойчивом движении частиц с другими зарядами траектория на

начальном этапе за 15–20 периодов достигает положения, в котором может монотонно колебаться длительное время, меняя направление каждые полпериода по оси x (рис. 4).

Для случая, когда энергия частицы непрерывно возрастает, что в результате приводит к уходу частицы из ловушки, т.к. силы удержания ловушки уже не могут вернуть частицу, вид траектории отличается уже на начальном этапе. Частица каждые полпериода меняет свое направление и никогда не возвращается на предыдущую траекторию

(рис. 3). Явно выделена закономерность их циклического развития, при котором траектория на каждом следующем периоде колебания лежит вне предыдущей. За один период 0,02 секунды частица дважды меняет направление движения.

При расчетах не только вбрасывали частицу с начальной скоростью, но и помещали ее в центр неподвижно, и в этом случае расчеты показывали такие же траектории: монотонные колебания или траектории с увеличивающимся размахом.

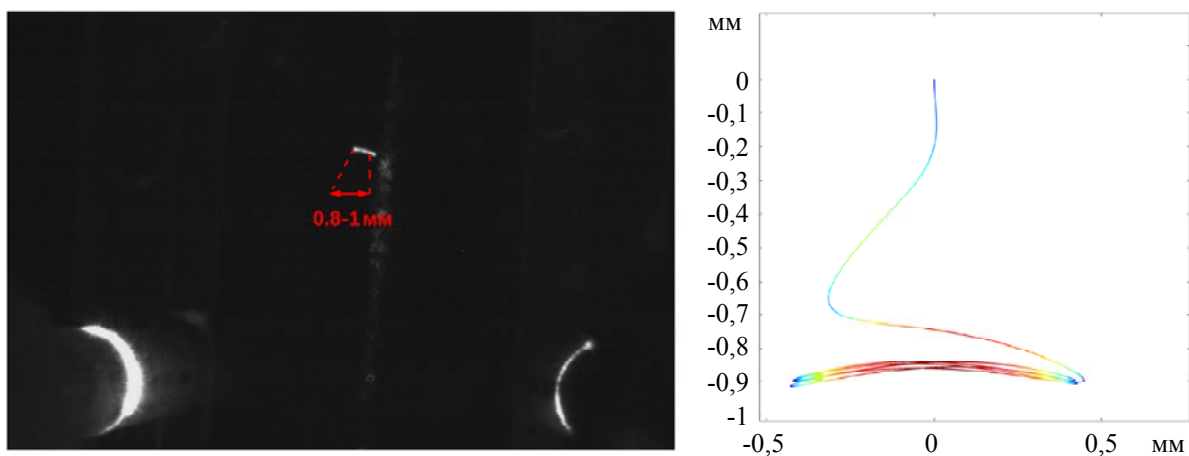


Рис. 2. Устойчивая траектория одной частицы в ловушке, полученная при эксперименте (слева) и при расчете (справа). Внизу видны подсвеченные торцы электродов ловушки. Справа нулевая координата соответствует оси ловушки. Амплитуда переменного напряжения на электродах 5 кВ, размер частицы 20 мкм, заряд $9,8 \times 10^4$ зарядов электрона. Диапазон скорости 0–0,15 м/с

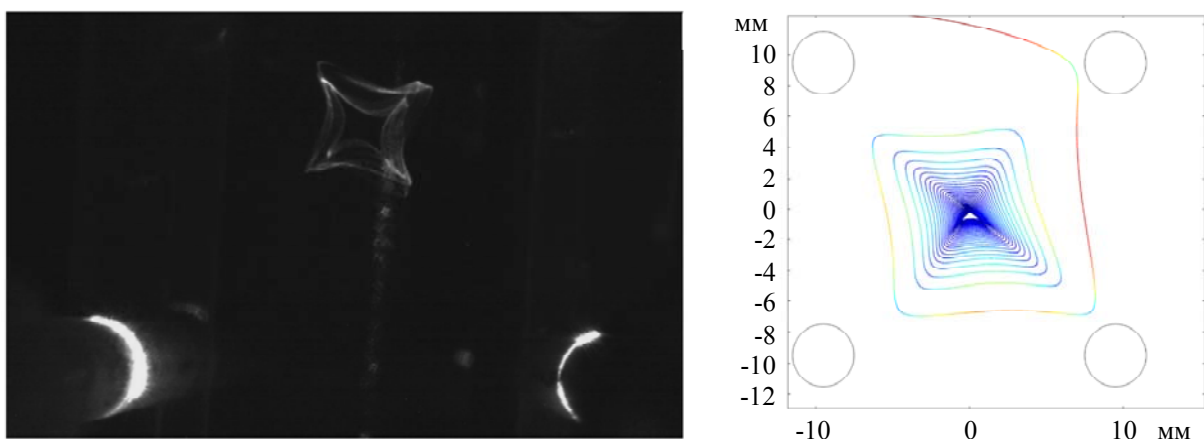


Рис. 3. Траектории неустойчивого движения одной частицы с вылетом из ловушки. Эксперимент – слева, расчет – справа. Амплитуда переменного напряжения на электродах 5 кВ, размер частицы 20 мкм, заряд $1,4 \times 10^5$ зарядов электрона. Диапазон скорости 0–2,32 м/с

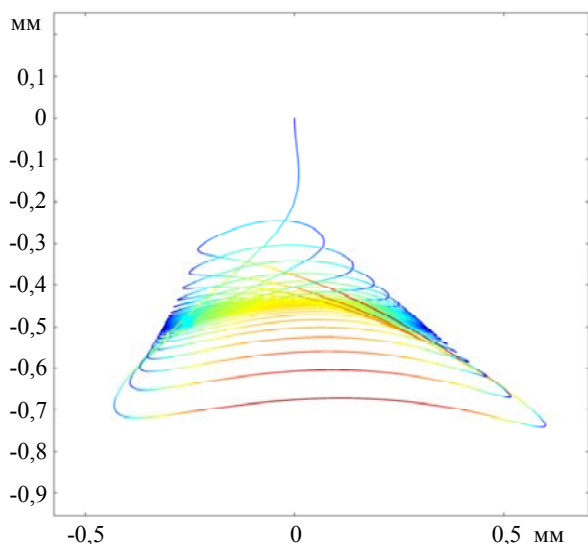


Рис. 4. Траектории медленного становления, размах вдоль оси x равен 1,2 мм, вдоль оси y – 0,6 мм, достижение устойчивости за 15–20 периодов. Амплитуда переменного напряжения на электродах 5 кВ, размер частицы 20 мкм, заряд $1,33 \times 10^5$ зарядов электрона. Диапазон скорости 0–0,15 м/с

Заключение

По результатам расчета определены условия удержания частицы и развития неустойчивости в виде регулярной траектории с увеличивающейся амплитудой. Получены траектории регулярного упорядоченного движения заряженной частицы, амплитуда которого либо приходит к стационарному устойчивому значению, либо постепенно расширяется. Полученные траектории отличаются характером их развития уже на начальном этапе при захвате частиц ловушкой. Это очень удобно для экспериментального определения границ удержания, так как можно захватить одну частицу с известными параметрами и, не доводя до критического состояния вылета из ловушки, по характеру развития траектории на начальном этапе определить, будет ли частица удержана или нет. Таким образом, весь эксперимент можно провести с одной частицей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-01129-23-00).

ЛИТЕРАТУРА

1. Golovizin A. A., Kalganova E. S., Sukachev D. D. *et al.* / Quantum Electron. 2015. Vol. 45. P. 482.
2. Debnath S., Linke N. M., Figgatt C., Landsman K. A., Wright K., Monroe C. / Nature. 2016. Vol. 536. P. 63.
3. Semerikov I. A., Zalivako I. V., Borisenko A. S., Aksenov M. D., Kolachevsky N. N., Khabarova K. Yu. / Bull. Lebedev Phys. Inst. 2020. Vol. 47. P. 385.
4. Nam Y., Chen J. S., Pisenti N. C. *et al.* / Quantum Information. 2020. Vol. 6. P. 33.
5. Davis E. James / Aerosol Science and Technology. 2007. Vol. 26. P. 212.
6. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitskiy D. S., Pecherkin V. Y., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. / Contrib. Plasma Phys. 2016. Vol. 56. P. 419.
7. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitskiy D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S., Fortov V. E. / New J. Phys. 2013. Vol. 15. P. 043047.
8. Lapitskiy D. S., Filinov V. S., Deputatova L. V., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. / High Temp. 2015. Vol. 53. P. 1.
9. Syrovatka R., Medvedev Yu., Filinov V., Vasilyak L., Deputatova L., Vladimirov V., Pecherkin V. / Physics Letters A. 2019. Vol. 383. P. 338.
10. Syrovatka R., Filinov V., Vasilyak L., Fortov V., Deputatova L., Vladimirov V., Pecherkin V. / Physics Letters A. 2019. Vol. 383. P. 1942.
11. Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Владимиров В. И. / Прикладная физика. 2022. № 4. С. 18.
12. Syrovatka R. A., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Deputatova L. V., Vladimirov V. I., Popel O. S., Tarasenko A. B. / Journal of Electrostatics. 2021. Vol. 112. P. 103583.
13. Rybin V., Rudyi S., Rozhdestvensky Y. / International Journal of Non-Linear Mechanics. 2022. Vol. 147. P. 104227.
14. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Panov V. A. / Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 653. P. 015152.

Stable and unstable charged particle motion trajectories within electrodynamic quadrupole trap in air

M. S. Dobroklonskaya, L. M. Vasilyak, V. I. Vladimirov and V. Ya. Pecherkin

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vpecherkin@yandex.ru

Received 13.03.2023; revised 28.03.2023; accepted 4.04.2023

The experimental and computational studies results of single charged particle trapping in a horizontally oriented linear electrodynamic Paul trap at atmospheric air pressure are presented. Stable and unstable particle trajectories are obtained. These trajectories are revealed to differ in the pattern of their progress at the initial stage of particle trapping. The trajectories obtained by calculation and experiment are compared.

Keywords: charged particles, linear electrodynamic quadrupole trap, trajectories of movement, air at atmospheric pressure

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-29-34

REFERENCES

1. Golovizin A. A., Kalganova E. S., Sukachev D. D. et al., Quantum Electron. **45**, 482 (2015).
2. Debnath S., Linke N. M., Figgatt C., Landsman K. A., Wright K. and Monroe C., Nature **536**, 63 (2016).
3. Semerikov I. A., Zalivako I. V., Borisenko A. S. et al., Bull. Lebedev Phys. Inst. **47**, 385 (2020).
4. Nam Y., Chen J. S., Pisenti N. C. et al., Quantum Information **6**, 33 (2020).
5. Davis E. James, Aerosol Science and Technology **26**, 212 (2007).
6. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitskiy D. S., Pecherkin V. Y., Vasilyak L. M. and Vladimirov V. I., Contrib. Plasma Phys. **56**, 419 (2016).
7. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitskiy D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S. and Fortov V. E., New J. Phys. **15**, 043047 (2013).
8. Lapitskiy D. S., Filinov V. S., Deputatova L. V., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., High Temp. **53**, 1 (2015).
9. Syrovatka R., Medvedev Yu., Filinov V., Vasilyak L., Deputatova L., Vladimirov V. and Pecherkin V., Physics Letters A. **383**, 338 (2019).
10. Syrovatka R., Filinov V., Vasilyak L., Fortov V., Deputatova L., Vladimirov V. and Pecherkin V., Physics Letters A. **383**, 1942 (2019).
11. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Vladimirov V. I., Applied Physics, № 4, 18 (2022) [in Russian].
12. Syrovatka R. A., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Deputatova L. V., Vladimirov V. I., Popel O. S. and Tarasenko A. B., Journal of Electrostatics **112**, 103583 (2021).
13. Rybin V., Rudyi S. and Rozhdestvenskiy Y., International Journal of Non-Linear Mechanics **147**, 104227 (2022).
14. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P. and Panov V. A., Journal of Physics: Conference Series. **653**, 015152 (2015).