

УДК 53.09; 53.043  
EDN: RLLUDG

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty



## Удержание микрочастиц квадрупольной ловушкой с импульсно периодическим напряжением прямоугольной формы

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

*Впервые экспериментально и теоретически рассмотрено влияние прямоугольной формы напряжения на удержание диэлектрических заряженных частиц микронного размера в электродинамической квадрупольной ловушке в воздухе. Проведено сравнение нижней границы удержания для ловушки с прямоугольной и синусоидальной формой напряжения. Рассчитаны траектории движения микрочастиц для двух форм напряжения при разных амплитудах. Экспериментально и расчетами показано, что при прямоугольной форме напряжения ловушка удерживает частицы при более низкой амплитуде напряжения, чем при синусоидальной форме, и их траектории более устойчивы.*

*Ключевые слова:* заряженные частицы, линейная электродинамическая квадрупольная ловушка, удержание частиц, траектории движения, воздух при атмосферном давлении, напряжение прямоугольной формы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-3-93-98

### Введение

Изобретение В. Паулем в 1953 году квадрупольной ионной ловушки [1] открыло способ удержания и фильтрации заряженных частиц. Наибольший интерес и развитие они получили в области масс-спектрометрии, позволив анализировать состав любых химических элементов, молекул, нано- и микрочастиц; разделять их на основе стабильности траектории движения. Существует несколько известных конструкций для захвата и удержа-

ния, как одиночных частиц, так и большого их количества в квадрупольном потенциале: трехмерная гиперболическая, линейная, цилиндрическая (запатентована Ленгмюром в 1962 году [2]), тороидальные [3], двухмерная ионная ловушка типа Halo [4], двухмерная прямоугольная [5]. Все они работают по одному принципу — на электроды подается переменное синусоидальное напряжение с постоянной составляющей [6], и в области между электродами создается удерживающий потенциал, или потенциальная яма, в которой могут удерживаться одиночные заряженные частицы или их системы [7]. Для синусоидальной форме напряжения движение частиц в поле ловушки, его предсказание и анализ стабильности траекторий хорошо описывается уравнениями Матье [6, 8].

Стабильность кулоновских систем и траекторий уединенных заряженных частиц в ловушке во многом зависят не только от параметров самих частиц, но и от стабильности напряжения электродов ловушки. Поскольку в задачах масс-спектрометрии вопросы стабильности и улучшения разделения ионов по

---

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

Статья поступила в редакцию 22.04.2024  
После доработки 17.05.2024  
Принята к публикации 22.05.2024  
Шифр научной специальности: 2.2.9

---

© Доброклонская М. С., Печеркин В. Я.,  
Владимиров В. И., Василяк Л. М., 2024

массам особенно важны, то именно в этом направлении было впервые рассмотрено влияния формы напряжения на устойчивость ионов в ловушке. В первой работе [9], рассматривающей форму напряжения, отличную от гармонической, был проведен теоретический расчет зон стабильности и анализ движения заряженных частиц при прямоугольном напряжении, для конструкции квадрупольного трехмерного масс-анализатора. Теоретически были определены режимы импульсного прямоугольного напряжения, при которых требуется меньшая стабильность питающего напряжения, чем для гармонического сигнала для достижения требуемой разрешающей способности. В следующей, преимущественно экспериментальной работе [10] была создана схема питания линейного квадрупольного масс-фильтра для ионов с прямоугольными периодическими импульсами напряжения, а также отмечено, что несмотря на внешнюю схожесть диаграммы стабильности для синусоидальной формы напряжения, при прямоугольной пик стабильности может быть достигнут при меньших значениях напряжения для некоторых параметров. По мнению авторов, такая форма напряжения позволяет избежать некоторые технические трудности для достижения высокой стабильности для квадрупольного фильтра ионов. Следует отметить, что для этого требовались низкие амплитуды напряжения, около 30 В, что позволяло применить простую транзисторную схему. Эти исследования были выполнены почти в начале 1970-х годов, однако схема питания с прямоугольной формой напряжения нигде не используется. В более поздних теоретических работах [11, 12] обобщены описанные ранее модели для ионной ловушки, и сделан анализ влияния параметров прямоугольного сигнала на стабильность траекторий ионов. Работы [9–12] были выполнены с целью использования квадрупольного поля для фильтрации ионов.

Линейная квадрупольная электродинамическая ловушка является наиболее распространенным вариантом конструкции для фильтрации и удержания частиц нано- и микронных размеров как в вакууме, так и в воздухе при атмосферном давлении в силу ее простоты и эффективности. Удержание и управление

кулоновскими системами и отдельными микрочастицами при гармоническом напряжении хорошо изучены теоретически и экспериментально [7, 8, 13–15]. Влияние формы напряжения на удержание частиц микронного размера и кулоновских структур ранее не рассматривалось. Цель настоящей работы – исследования влияния формы напряжения на движение заряженных частиц микронного размера в квадрупольной электродинамической ловушке и их удержание при атмосферном давлении в воздухе при синусоидальном и прямоугольном переменном напряжении на электродах ловушки.

### Эксперимент

Конструкция линейной квадрупольной ловушки была подробно описана нами ранее [16]. Ловушка состоит из четырех цилиндрических латунных стержней диаметром 4 мм, расположенных в углах квадрата на расстоянии 2 см друг от друга. На пары диагональных электродов подается напряжение одинаковой амплитуды и противоположной фазы. Эксперименты выполнены с синусоидальной и прямоугольной формами напряжения частотой 50 Гц на удерживающих электродах. В первом случае на динамические электроды ловушки подается переменное напряжение синусоидальной формы амплитудой 5 кВ и ниже. Полидисперсные частицы из оксида алюминия заряжаются индуктивным методом на поверхности металлической пластины постоянным напряжением 4 кВ и затем вносятся в ловушку. Ловушка заполняется частицами и через некоторое время релаксации, когда часть частиц с избыточным или недостаточным отношением заряда к массе покидает ловушку, внутри остается устойчивая кулоновская система. После достижения системой устойчивости, амплитуда напряжения понижалась до 4 кВ, и часть частиц покидала ловушку. После стабилизации кулоновской системы заряженных частиц повторяли понижение амплитуды переменного напряжения на электродах до 3 кВ и 2 кВ. С каждым понижением амплитуды внутри ловушки оставались все более мелкие частицы. При плавном понижении амплитуды с 3 кВ было зафиксировано, что при напряжении 2 кВ все частицы

покинули ловушку. Такие же эксперименты были сделаны с напряжением прямоугольной формы, (знакопеременный меандр) и начальной амплитудой 5 кВ. Обнаружено, что частицы удерживаются при более низких амплитудах напряжения по сравнению с синусоидальным напряжением. При амплитуде напряжения 2 кВ мелкая фракция частиц удерживается в ловушке, совершая устойчивые колебания. Для этой формы напряжения частицы удерживались ловушкой вплоть до амплитуды 1,2 кВ.

### Численное моделирование

Ранее [17] нами была показана возможность сепарации по размерам смеси полидисперсных частиц 2–100 мкм путем ступенчатого изменения амплитуды напряжения на электродах электродинамической ловушки. При изменении амплитуды переменного напряжения с 2 до 0 кВ из ловушки выпадают частицы оксида алюминия размерами 4–14 мкм (рис. 1). Поскольку амплитуда 2 кВ соответствует нижней границе удержания, то компьютерное моделирование нижней границы удержания для двух форм переменного напряжения мы проводили для частиц с размерами из этого диапазона.

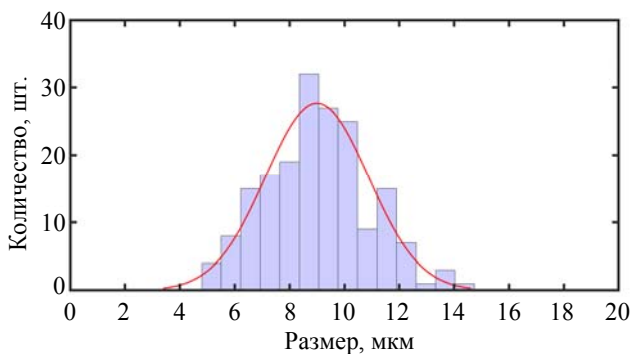


Рис. 1. Распределение по размеру частиц, выпавших из ловушки при снижении синусоидального напряжения с 2 до 0 кВ. Выборка из 260 частиц

На основе результатов сепарации частиц и расчета их траекторий [16, 17] и рисунка 1 примем для расчета диаметр частиц 9 мкм, поскольку самая многочисленная фракция частиц, выпавших при снижении амплитуды синусоидального напряжения ниже 2 кВ, соответствует этому размеру, и примем заряд

частицы порядка 47000 зарядов электрона  $e$ . При расчетах траектории одной частицы методом молекулярной динамики решалось дифференциальное уравнения Ланжевена для каждой частицы:

$$ma = F_e + F_g + F_f + F_s,$$

где  $F_e$  – сила электрического поля ловушки,  $F_g$  – сила гравитации,  $F_f$  – сила трения частицы о воздух задана формулой Стокса,  $F_s$  – стохастический член. Воздух в ловушке неподвижен. Начальное положение частицы при расчете задавалось в центре ловушки в точке с координатами (0,0) с нулевой начальной скоростью.

### Результаты и обсуждение

Результаты расчета для синусоидального напряжения представлены на рисунке 2(a–б). Траектории на рисунках соответствуют промежуткам времени после снижения величины амплитуды с 4 до 3 кВ (рис. 2a) и с 3 до 2 кВ (рис. 2б). Рисунки выполнены в осях  $x$ – $y$ , траектории изображены в увеличенном масштабе, поскольку размах колебания частицы значительно меньше расстояния между электродами. Справа от рисунков расположена шкала скорости, которую развивает частица при движении. Поскольку расчет начинался при 5 кВ, то на рисунке 2 начальное положение частицы по оси  $y$  соответствует устойчивой траектории частицы при предыдущей амплитуде напряжения. Процесс стабилизации траектории после снижения напряжения сопровождается ростом амплитуды колебания частицы и постепенным замедлением скорости. При 2 кВ частица выпадает из ловушки, что видно из ее траектории и что соответствует наблюдению при эксперименте для этой формы напряжения.

Расчет для прямоугольной формы напряжения представлен на рисунке 3. После снижения напряжения с 3 до 2 кВ (рис. 3a) частица выходит на устойчивую траекторию и стабильно продолжает колебаться. При дальнейшем понижении амплитуды с 2 до 1,2 кВ (рис. 3б) частица теряет устойчивость и выпадает из ловушки.

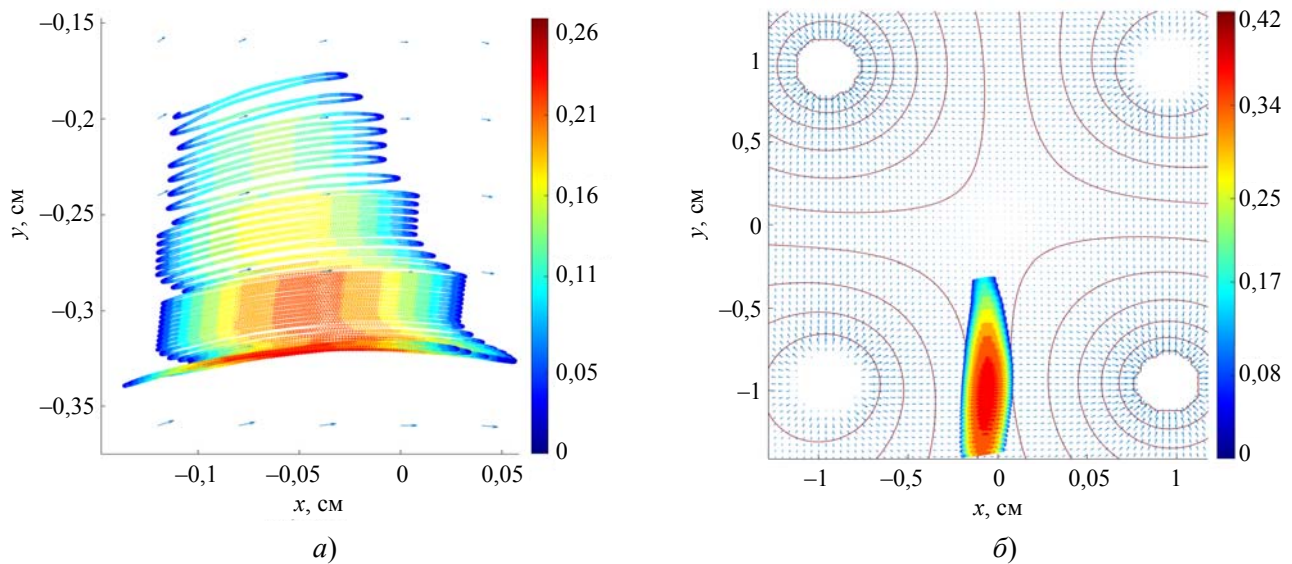


Рис. 2. Траектория частицы при синусоидальной форме напряжения при уменьшении амплитуды: а) – с 4 до 3 кВ; б) – с 3 до 2 кВ

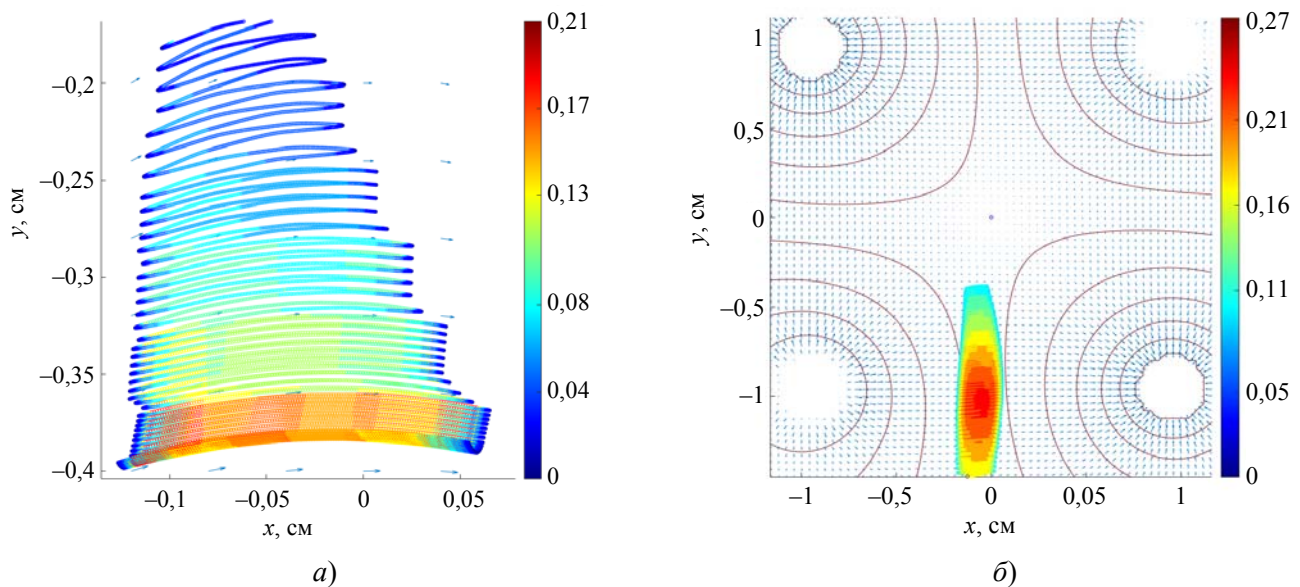


Рис. 3. Траектория частицы при прямоугольной форме напряжения при уменьшении амплитуды: а) – с 3 до 2 кВ; б) – с 2 до 1,2 кВ

### Заключение

Впервые экспериментально и моделированием показана возможность удержания частиц микронного размера внутри квадрупольной электродинамической ловушки в воздухе при атмосферном давлении с помощью знакопеременного сигнала прямоугольной формы. Выполнено сравнение режимов удержания и устойчивости для синусоидального и прямоугольного напряжения. Рассчитаны траектории движения, позволяющие найти

устойчивые состояния и амплитуду колебаний в этом состоянии. Показано, что преимуществом прямоугольного напряжения является более низкая граница удержания частиц. Большое число параметров (наклон фронта, ширина импульса, скважность) может значительно расширить возможности управления заряженными системами и одиночными частицами. Изменение формы напряжения на динамических электродах позволит стабилизировать частицы и добиться сокращения размаха колебаний частиц, что очень важно при

спектрометрии. Полученные экспериментальные результаты и траектории движения, полученные при моделировании, показали успешность и перспективность применения прямоугольной формы напряжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Paul W., Reihard H. P., Zahn U. V. / Z. Physic. 1958. Vol. 152. P. 143.
2. Langmuir D. B., Langmuir R. V., Shelton H., Wuerker R. F. Containment device. Patent for invention № 3065640 (US). 1962.
3. Lammert S. A., Plass W. R., Thompson C. V., Wise M. B. / Int. J. Mass Spectrom. 2001. Vol. 212. P. 25.
4. Austin D. E., Wang M., Tolley S. E., Maas J. D., Hawkins A. R., Rockwood A. L., Tolley H. D., Lee E. D., Lee M. L. / Anal. Chem. 2007. Vol. 79. P. 2927.
5. Ouyang Z., Wu G. X., Song Y. S., Li H. Y., Plass W. R., Cooks R. G. / Anal. Chem. 2004. Vol. 76. P. 4595.
6. Major F. G., Gheorghe V. N., Werth G. Charged Particle Traps. Physics and Techniques of Charged Particle Field Confinement. – Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
7. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M. / Phys. Rep. 2023. Vol. 1016. P. 1.
8. Ланицкий Д. С., Филинов В. С., Василяк Л. М., Сыроватка Р. А., Депутатова Л. В., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. / Прикладная физика. 2017. № 4. С. 32.
9. Шеретов Э. П., Терентьев В. И. / ЖТФ. 1972. Т. 42. С. 953.
10. Richards J. A., Huey R. M., Hiller J. / Int. J. Mass Spectrom. 1973. Vol. 12. P. 317.
11. Ding Li, Sudakov M., Kumashiro S. / Int. J. Mass Spectrom. 2002. Vol. 221. P. 117.
12. Sudakov M., Nikolaev E. / Eur. J. Mass Spectrom. 2002. Vol. 8. P. 191.
13. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitsky D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S., Fortov V. E. / New J. Phys. 2013. Vol. 15. P. 12.
14. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. / Plasma Phys. Rep. 2023. Vol. 49. P. 300.
15. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. / Contrib. Plasma Phys. 2016. Vol. 56. P. 419.
16. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 29.
17. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я., Попов Д. И. / Прикладная физика. 2023. № 3. С. 19.

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty

## Trapping of microparticles by a pulsed periodic rectangular voltage quadrupole trap

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

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

*Received 22.04.2024; revised 17.05.2024; accepted 22.05.2024*

***The influence of a rectangular voltage waveform on the trapping of micron-sized dielectric charged particles in an electrodynamic quadrupole trap in air has been examined experimentally and theoretically for the first time. We compare the lower trapping limit for the trap with rectangular and sinusoidal voltage waveforms. Microparticle trajectories for two voltage waveforms at different amplitudes were calculated. According to experiments and calculations, with rectangular voltage form, the trap holds particles at a lower voltage amplitude than with sinusoidal form, and their trajectories are more stable.***

**Keywords:** charged particles, linear electrodynamic quadrupole trap, particle trapping, trajectories of motion, air at atmospheric pressure, rectangular voltage.

## REFERENCES

1. Paul W., Reihard H. P. and Zahn U. V., *Z. Physic.* **152**, 143 (1958).
2. Langmuir D. B., Langmuir R. V., Shelton H. and Wuerker R. F. Containment device. Patent for invention № 3065640 (US). 1962.
3. Lammert S. A., Plass W. R., Thompson C. V. and Wise M. B., *International Journal of Mass Spectrometry* **212**, 25 (2001).
4. Austin D. E., Wang M., Tolley S. E., Maas J. D., Hawkins A. R., Rockwood A. L., Tolley H. D., Lee E. D. and Lee M. L., *Analytical Chemistry* **79**, 2927 (2007).
5. Ouyang Z., Wu G. X., Song Y. S., Li H. Y., Plass W. R. and Cooks R. G., *Analytical Chemistry* **76**, 4595 (2004).
6. Major F. G., Gheorghe V. N. and Werth G. *Charged Particle Traps. Physics and Techniques of Charged Particle Field Confinement*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
7. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A. and Vasilyak L. M., *Physics Reports* **1016**, 1 (2023).
8. Lapitsky D. S., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., *Applied Physics*, № 4, 32 (2017) [in Russian].
9. Sheretov E. P. and Terentiev V. I., *Journal of Technical Physics* **42**, 953 (1972).
10. Richards J. A., Huey R. M. and Hiller J., *International Journal of Mass Spectrometry* **12**, 317 (1973).
11. Ding Li, Sudakov M. and Kumashiro S., *International Journal of Mass Spectrometry* **221**, 117 (2002).
12. Sudakov M. and Nikolaev E., *European Journal of Mass Spectrometry* **8**, 191 (2002).
13. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitsky D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S. and Fortov V. E., *New Journal of Physics* **15**, 12 (2013).
14. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Vladimirov V. I., *Plasma Physics Reports* **49**, 300 (2023).
15. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Vladimirov V. I., *Contributions Plasma Physics* **56**, 419 (2016).
16. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., *Applied Physics*, № 2, 29 (2023) [in Russian].
17. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. and Popov D. I., *Applied Physics*, № 3, 19 (2023) [in Russian].