

УДК 53.09; 53.043  
EDN: EAVHDA

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty



## Сепарация полидисперсных заряженных микрочастиц в воздухе электродинамической линейной ловушкой

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

*Представлены результаты разделения полидисперсной смеси заряженных диэлектрических микрочастиц с помощью линейной электродинамической квадрупольной ловушки в воздухе при атмосферном давлении. Экспериментально показано, что размеры удерживаемых ловушкой микрочастиц в сильной степени зависят от величины напряжения на линейных электродах.*

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-39-44

### Введение

В течение последних десятилетий наблюдается интерес к использованию монодисперсных систем, особенно состоящих из микро- и нано-размерных частиц, в различных технологических процессах. Известны направления использования монодисперсных порошков в исследованиях нефтехимической промышленности, при исследовании эволюции космических объектов и исследованиях пылевой плазмы [1–5]. Идентичность размерных параметров частиц таких смесей в ряде случаев может значительно улучшить технологию или создать совершенно новый процесс

или вещество. Однородность размера частиц важна при измерениях кинематических параметров среды, например, в методах цифровой трассерной визуализации PIV, где частицы (обычно субмикронных или микронных размеров) с пренебрежимо малой массой и объемной концентрацией, вводятся в исследуемую среду. Также особый интерес представляют монодисперсные аэрозоли (ввиду сильной зависимости свойств дисперсных систем от размера капель) и твердые частицы [6–8]. Поскольку в естественных условиях частицы почти всегда обладают некоторым зарядом, неуклонно растет интерес к новым устройствам, позволяющим разделять по размеру большое количество заряженных частиц при атмосферном давлении в воздухе.

Электродинамическая ловушка Пауля, обеспечивающая удержание нескольких тысяч заряженных частиц успешно применяется при изучении кулоновских структур [9, 10], распространения в них уединенных волн плотности [11–13], возникновения неустойчивостей. Ловушки также могут найти практическое применение при очистке различных поверхностей или панелей солнечных элементов [14, 15], для очистки газов от частиц заданных размеров, а также в научных и лабораторных

---

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

Статья поступила в редакцию 15.05.2023  
После доработки 26.05.2023  
Принята к публикации 30.05.2023

---

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

исследованиях для определения физических [16, 17] и термодинамических [18, 19] параметров захваченных отдельных частиц и структур. Удержание частиц в такой ловушке в значительной степени зависит от параметров ловушки, частоты и амплитуды напряжения на электродах, отношения заряда к массе частиц [20–22].

Целью данной работы является исследование разделения полидисперсной смеси твердых частиц по размеру с помощью электродинамической линейной квадрупольной ловушки Пауля при атмосферном давлении в воздухе. Варьируемым параметром выбрана амплитуда переменного напряжения на электродах ловушки.

### Эксперимент

Схема эксперимента и линейной квадрупольной ловушки была подробно описана нами ранее [21, 23]. Линейная квадрупольная ловушка – это четыре цилиндрических электрода, расположенные в вершинах квадрата с длиной стороны 23 мм, на диагональные пары которых подается переменное напряжение

противоположной фазы с частотой 50 Гц. Диаметр горизонтально расположенных динамических электродов 4 мм, длина 300 мм. Удержание заряженных частиц в ловушке описывается системой уравнений Маттье [20]. Основным параметром, определяющим удержание частицы ловушкой, это отношение заряда частицы к ее массе  $q/m$ . Существуют устойчивые решения для определенных комбинаций амплитуды и частоты подаваемого на электроды напряжения при заданном отношении. При уменьшении напряжения электрическое поле ловушки не сможет удерживать частицы с наименьшими значениями  $q/m$ , которые будут выпадать из ловушки под действием силы тяжести. Самое малое  $q/m$  будет у частиц большего размера, так как заряд на частице пропорционален радиусу или площади поверхности (квадрату радиуса), в зависимости от способа зарядки; а масса пропорциональна радиусу в кубе [24].

В эксперименте использовался полидисперсный порошок оксида алюминия  $Al_2O_3$ . На рис. 1 представлено экспериментальное распределение частиц по размерам в исходном порошке оксида, полученное из выборки 300 частиц.

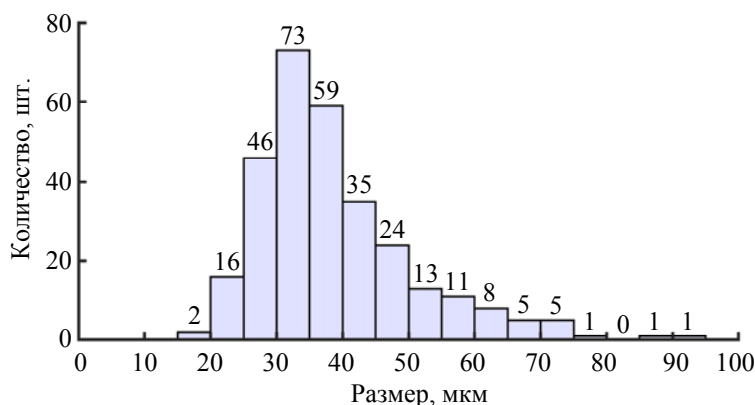


Рис. 1. Распределение исходных частиц по размеру при выборке из 300 частиц

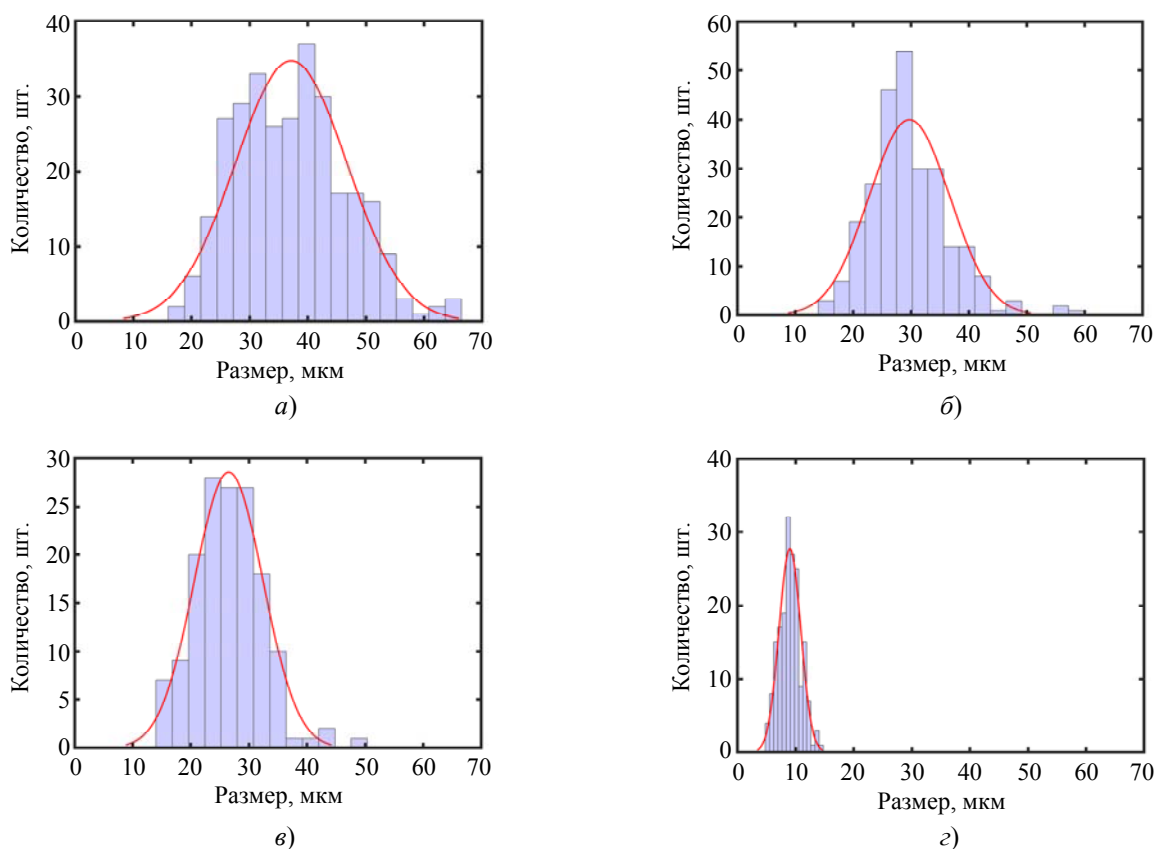
Экспериментально установлена максимальная амплитуда переменного напряжения на электродах 11 кВ, при котором большая часть заряженных частиц полидисперсной смеси удерживается внутри ловушки. Для сообщения заряда частицам, достаточного для захвата и удержания внутри ловушки [24], использовался метод индукционной зарядки на металлической пластине с потенциалом 7 кВ. Величина потенциала была выбрана экспериментально, т. к. при нем частицы отрывались от зарядной пластины и захватывались ло-

вушкой. После того, как система захваченных ловушкой частиц пришла в стационарное устойчивое состояние, под нижние электроды ловушки вводится предметное стекло. Амплитуда переменного напряжения на электродах понижается на 2 кВ. После того, как система снова вернулась в новое устойчивое состояние, предметное стекло с осевшими частицами удаляли, и на его место ставили новое предметное стекло. Затем опять понижали напряжение и повторяли циклы до тех пор, пока все частицы не покинут ловушку.

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены распределения по размеру частиц, выпавших из ловушки при каждом уменьшении напряжения. Красной линией на графиках обозначена аппроксимационная кривая нормальной функции плотности распределений. Изначальное распределение размеров частиц в смеси от 5 до 80 мкм. Отсутствие фракции размеров 5–10 мкм в распределении исходной смеси (см. рис. 1) объясняется малым содержанием этой фракции и возможным прилипанием к более крупным частицам. Также следует отметить, что при индукционном методе зарядки частиц происходит предварительная сепарация на стадии отрыва частиц от пластины и захвата их ловушкой. Даже при небольшом содержании мелкоразмерной фракции в исходной смеси, ловушка захватит больше мелких частиц, т. к. для них шире область удержания. Если есть прилипшие частицы, то они при зарядке или в ловушке разойдутся из-за электростатического отталкивания. После первого этапа понижения напряжения с 8 до 6 кВ из

ловушки выпали частицы с размерами в диапазоне 30–45 мкм согласно аппроксимационной кривой. Измерен размер 300 частиц на этом этапе. Как и ожидалось, ловушку покинули и самые тяжелые частицы размером 50–80 мкм. На остальных этапах изменения напряжения количество частиц таких больших размеров крайне незначительно. При следующем снижении напряжения с 6 до 4 кВ распределение основной массы выпавших частиц (измерено 260 частиц) лежит в диапазоне 25–35 мкм. При снижении с 4 до 2 кВ (измерены 152 частицы) диапазон сузился до 20–30 мкм, и на заключительном этапе ловушку покинула самая легкая фракция (измерены 184 частицы) преимущественно с размерами 5–10 мкм. Присутствие выбросов в размерах частиц при сужении размерного диапазона на каждой шаге эксперимента можно объяснить кулоновским взаимодействием между частицами и неустойчивостями структуры. Эксперимент с заполнением и последующим полным очищением ловушки проводился 5 раз, представлены данные наиболее равномерной сепарации.



**Рис. 2.** Распределение по размеру частиц, выпавших из ловушки при снижении напряжения: а) с 8 до 6 кВ. Выборка из 300 частиц. б) с 6 до 4 кВ. Выборка из 260 частиц. в) с 4 до 2 кВ. Выборка из 152 частиц. г) с 2 до 0 кВ. Выборка из 184 частиц

## Заключение

Экспериментально продемонстрировано разделение полидисперсной смеси заряженных индукционным способом микрочастиц оксида алюминия в воздухе с помощью квадрупольной линейной ловушки Пауля путем изменения величины напряжения на линейных электродах. При уменьшении напряжения от максимального 8 кВ, ступенчатым образом с шагом 2 кВ на каждом этапе из ловушки высыпаются более тяжелые частицы, а размеры высыпающихся частиц уменьшаются в среднем на 10–15 микрон. Более широкий разброс размеров после первого этапа может быть следствием скачкообразного снижения напряжения, при котором в заполненной ловушке возникает более сильное возмущение облака частиц. На следующих этапах размер облака меньше, поэтому частицы более устойчивы и более четко структурированы по размерам по объему ловушки. Для более тонкой фильтрации следует использовать первично отфильтрованную фракцию и снижать напряжение более мелкими шагами.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vishnyakov V. I., Dragan G. S. / *Condens. Matter Phys.* 2007. Vol. 10. P. 201.
2. Vishnyakov V. I., Dragan G. S. / *Condens. Matter Phys.* 2003. Vol. 6. P. 687.
3. Smith B., Hyde T., Matthews L., Reay J., Cook M., Schmoke J. / *Adv. Space Res.* 2003. Vol. 41. P. 1510.
4. Fortov V. E., Khrapak A. G., Khrapak S. A., Molotkov V. I., Petrov O. F. / *Physics Uspekhi.* 2004. Vol. 47 (5). P. 447.
5. Guo Tian, Xinyan Liu, Chenxi Zhang, Xiaoyu Fan, Hao Xiong, Xiao Che, Zhengwen Li, Binhang Yan, Lan Zhang, Ning Wang, Hong-Jie Peng, Fei We / *Nat Commun.* 2022. Vol. 13. P. 5567.
6. Zalkind V. I., Zeigarnik Y. A., Nizovskii V. L., Nizovskii L. V., Shchigel S. S. / *High Temp.* 2018. Vol. 56. P. 153.
7. Davis E. James / *Aerosol Science and Technology.* 2007. Vol. 26:3. P. 212.
8. Varaksin A. Yu., Protasov M. V., Teplitskiy Yu. S. / *High Temperature.* 2014. Vol. 52. P. 554.
9. 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.
10. 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.
11. Syrovatka R. A., Medvedev Yu., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Deputatova L. V., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. / *Physics Letters A.* 2019. Vol. 383. P. 338.
12. Syrovatka R. A., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Fortov V. E., Deputatova L. V., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. / *Physics Letters A.* 2019. Vol. 383. P. 1942.
13. Syrovatka R. A., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Deputatova L. V., Pecherkin V. Ya., Vladimirov V. I. / *Contributions Plasma Physics.* 2020. Vol. 61. Iss. 2. P. e202000109.
14. 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.
15. Deputatova L. V., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M., Filinov V. S., Lapitskiy D. S., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. / *Contributions Plasma Physics.* 2018. Vol. 59. Iss. 3. P. 340–344.
16. Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Владимиров В. И. / *Прикладная физика.* 2022. № 4. С. 18.
17. Rybin V., Rudyi S., Rozhdestvenskiy Y. / *International Journal of Non-Linear Mechanics.* 2022. Vol. 147. P. 104227.
18. Lapitskiy D. S., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. / *Plasma Physics Reports.* 2019. Vol. 45. P. 406.
19. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitskiy D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. / *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1147. P. 012118.
20. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M. / *Physics Reports.* 2023. Vol. 1016. P. 1.
21. 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 Journal of Physics.* 2013. Vol. 15. P. 043047.
22. Lapitskiy D. S., Filinov V. S., Deputatova L. V., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. / *High Temperature.* 2015. Vol. 53. № 1. P. 3.
23. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. / *Прикладная физика.* 2023. № 2. P. 29.
24. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Panov V. A. / *Journal of Physics: Conference Series.* 2015. Vol. 653. P. 015152.

## Separation of polydisperse charged microparticles in air by an electrodynamic linear trap

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

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

*Received 15.05.2023; revised 26.05.2023; accepted 30.05.2023*

***The results of separation of a polydisperse mixture of charged dielectric microparticles using a linear electrodynamic quadrupole trap in air at atmospheric pressure are presented. It has been experimentally shown that the sizes of the microparticles held by the trap strongly depend on the voltage at the linear electrodes.***

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-39-44

### REFERENCES

1. Vishnyakov V. I., Dragan G. S., *Condens. Matter Phys.* **10**, 201 (2007).
2. Vishnyakov V. I., Dragan G. S., *Condens. Matter Phys.* **6**, 687 (2003).
3. Smith B., Hyde T., Matthews L., Reay J., Cook M. and Schmoke J., *Adv. Space Res.* **41**, 1510 (2003).
4. Fortov V. E., Khrapak A. G., Khrapak S. A., Molotkov V. I. and Petrov O. F., *Physics Uspekhi.* **47** (5), 447 (2004).
5. Guo Tian, Xinyan Liu, Chenxi Zhang, Xiaoyu Fan, Hao Xiong, Xiao Che, Zhengwen Li, Binhang Yan, Lan Zhang, Ning Wang, Hong-Jie Peng and Fei We, *Nat Commun.* **13**, 5567 (2022).
6. Zalkind V. I., Zeigarnik Y. A., Nizovskii V.L., Nizovskii L. V. and Shchigel S. S., *High Temp.* **56**, 153 (2018).
7. Davis E. James, *Aerosol Science and Technology* **26:3**, 212 (2007).
8. Varaksin A. Yu., Protasov M. V. and Teplitskiy Yu. S., *High Temperature* **52**, 554 (2014).
9. 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).
10. Lapitskiy D. S., Filinov V. S., Deputatova L. V., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., *High Temp.* **53**, 1 (2015).
11. Syrovatka R. A., Medvedev Yu., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Deputatova L. V., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., *Physics Letters A* **383**, 338 (2019).
12. Syrovatka R. A., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Fortov V. E., Deputatova L. V., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., *Physics Letters A* **383**, 1942 (2019).
13. Syrovatka R. A., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Deputatova L. V., Pecherkin V. Ya. and Vladimirov V. I., *Contributions Plasma Physics* **61**, e202000109 (2020).
14. 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).
15. Deputatova L. V., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M., Filinov V. S., Lapitskiy D. S., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., *Contributions Plasma Physics* **59**, 340 (2018).
16. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Vladimirov V. I., *Applied Physics*, № 4, 18 (2022) [in Russian].

17. Rybin V., Rudyi S. and Rozhdestvensky Y., International Journal of Non-Linear Mechanics. **147**, 104227 (2022).
18. Lapitskii D. S., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., Plasma Physics Reports **45**, 406 (2019).
19. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Vladimirov V. I., J. Phys.: Conf. Ser. **1147**, 012118 (2019).
20. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A. and Vasilyak L. M., Physics Reports **1016**, 1 (2023).
21. 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**, 043047 (2013).
22. Lapitsky D. S., Filinov V. S., Deputatova L. V., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., High Temperature **53** (1), 3 (2015).
23. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., Applied Physics, № 2, 29 (2023) [in Russian].
24. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P. and Panov V. A., Journal of Physics: Conference Series **653**, 015152 (2015).