

УДК 53.06, 53.07, 001.57, 621.317,329

## Удаление заряженных частиц микронных размеров переменными электрическими полями квадрупольного типа

Д. С. Лапицкий, Р. А. Сыроватка, Л. М. Василяк, В. С. Филинов,  
Л. В. Депутатова, В. И. Владимиров, В. Я. Печеркин

*Продемонстрирована возможность бесконтактного вывода частиц из газового потока в широком диапазоне размеров частиц. Полученные результаты указывают на возможность подбора параметров устройства для селективного удаления частиц необходимого размера.*

PACS: 52.77.-j, 52.90.+z

*Ключевые слова:* фильтры, очистка газа, газовый поток, сепарация частиц, ловушка Пауля.

### Введение

Для очистки воздуха от взвешенных частиц чаще всего применяют волоконные фильтры и устройства, использующие эффект коагуляции, например, скрубберы, а также электрофильтры с коронным разрядом, в которых частицы приобретают электрический заряд и удаляются электрическим полем на осадительный электрод [1—4]. Эффективность удаления зависит от размеров частиц и в области размеров 0,1—1 мкм эффективность этих устройств резко уменьшается, поэтому в различных схемах очистки воздуха в этой области применяют дополнительные фильтры.

Еще одним подходом может быть использование дополнительных ловушек для захвата частиц. Примеры таких ловушек и условия удержания частиц представлены в работах [5—13]. Однако эти потенциальные ловушки не применялись для улавливания частиц из газовых потоков.

Целью данной работы является предложение и демонстрация возможностей метода бесконтактного удаления микрочастиц из газового потока с помощью переменного электрического поля в линейной ловушке Пауля. В качестве примера экспериментально изучен процесс удаления частиц ок-

сида алюминия  $Al_2O_3$  с размерами 0,2—140 мкм из потока воздуха с помощью комплексного воздействия переменного и постоянного электрических полей. Исследованы дисперсионные составы исходного порошка, инжестированного в устройство, а также порошка, бесконтактно удаленного из газового потока. Проведенная работа позволяет сформулировать условия захвата заряженных частиц ловушкой.

### Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Ловушка Пауля для удаления частиц из газового потока располагалась в газовом тракте прямоугольного сечения с размерами сторон 6,1 и 6,6 см. Внутри газового тракта располагались следующие узлы установки: устройство для зарядки частиц 1, устройство для удаления заряженных частиц из газового потока 2, вытяжка для создания газового потока 3 и чистый контейнер 4 для удаленных частиц.

Вытяжка 3 располагалась в нижней части газового тракта и представляла собой вентилятор, создававший газовый поток, направленный сверху вниз со скоростью  $v_f = 30$  см/с. Верхний торец газового тракта был открыт для инъекции частиц внутрь устройства. Ниже верхнего торца газового тракта располагалось устройство для формирования коронного разряда для зарядки пролетающих через него частиц. Устройство состояло из трех решеток электродов, параллельных друг другу. Решетки располагались поперек газового потока, расстояние между решетками составляло 1,5 см. Крайние решетки были заземлены. Каждая из заземленных решеток состояла из 6 электродов диаметром 0,3 см, расстояние между электродами в решетке составляло 1,1 см. Центральная решетка состояла из 5 вольфрамовых электродов диаметром 70 мкм, расположенных на расстоянии 1,1 см

Лапицкий Дмитрий Сергеевич, научный сотрудник.

Сыроватка Роман Александрович, аспирант.

Василяк Леонид Михайлович, главный научный сотрудник.

Филинов Владимир Сергеевич, главный научный сотрудник.

Депутатова Лидия Викторовна, старший научный сотрудник.

Владимиров Владимир Иванович, старший научный сотрудник.

Печеркин Владимир Яковлевич, старший научный сотрудник.

Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН).

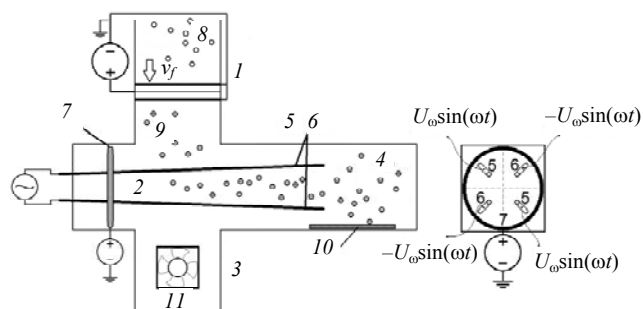
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Тел. 8 (495) 484-24-29. E-mail: dmitrucho@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22 октября 2015 г.

© Лапицкий Д. С., Филинов В. С., Владимиров В. И., Сыроватка Р. А., Василяк Л. М., Депутатова Л. В., Печеркин В. Я., 2015

друг от друга. На электроды центральной решетки подавался постоянный положительный потенциал 10 кВ. Средняя напряженность электрического поля между центральными и заземленными электродами составляла 7,1 кВ/см.



**Рис. 1.** Схема установки для удаления заряженных частиц из воздушного потока. Слева — вид сбоку, справа — вид с торца на устройство 2. 1 — устройство для формирования коронного разряда, 2 — устройство для удаления заряженных частиц из газового потока, 3 — вытяжка для создания газового потока; 4 — чистый контейнер для удаленных частиц, 5 и 6 — электроды ловушки, 7 — кольцевой электрод, 8 — нейтральные частицы, 9 — заряженные частицы, 10 — предметное стекло, 11 — вентилятор

Устройство 2 было установлено в прозрачном контейнере с прямоугольным внутренним сечением. В верхней и нижней грани контейнера были проделаны отверстия для прохождения газового потока сверху вниз. Левый торец контейнера был закрыт. Внутри устройства 2 были установлены электроды 5 и 6 линейной квадрупольной ловушки Пауля [5], длина электродов составляла 20 см, диаметр каждого электрода — 4 мм. Был выбран небольшой угол расхождения электродов, так что расстояние между торцами электродов увеличивалось с 1,8 см у левого конца до 2,8 см у правого. На электроды ловушки подавалось переменное напряжение со сдвигом по фазе на угол  $\pi$  между соседними электродами: напряжение на электродах 5 было  $U_{\omega} \sin(\omega t)$  и  $U_{\omega} \sin(\omega t + \pi)$  на электродах 6. Амплитуда переменного напряжения в экспериментах варьировалась от  $U_{\omega} = 9,3$  до 16 кВ, а частота  $f$  дискретно изменялась и составляла 50, 100 и 200 Гц. У левого края устройства 2 внутри контейнера располагался кольцевой электрод 7 диаметром 6,1 см, опоясывающий электроды 5 и 6, на который подавался постоянный потенциал  $U_{\Delta}$ . Контейнер 4 был съемным для возможности анализа удаленных из газового потока частиц после проведения эксперимента.

Эксперимент по удалению частиц из воздушного потока проводился по следующей схеме: частицы инжектировались в верхний торец газо-

го тракта и, подхваченные воздушным потоком, создаваемым вытяжкой, пролетали через устройство формирования коронного разряда, где они приобретали заряд. После этого они попадали в устройство 2 для их удаления из газового потока в контейнер 4.

Для исследования состава удаленных из газового потока частиц перед экспериментом контейнер 4 отсоединялся от установки, под правые торцы электродов 5 и 6 помещалось чистое предметное стекло, после чего контейнер 4 подсоединялся к установке. Во время эксперимента в верхний торец установки инжектировался порошок полидисперсных частиц оксида алюминия  $Al_2O_3$  с размерами частиц 0,2—140 мкм и плотностью 3990 кг/м<sup>3</sup>, а удаленные из газового потока частицы осаждались на предметном стекле в контейнере 4.

В эксперименте изучался размер инжектированных и удаленных из потока частиц при различных параметрах напряжения на электродах (амплитуда переменного напряжения и его частота, величина электрического потенциала на кольцевом электроде). Размер частиц определялся с помощью микроскопа и рассчитывался по следующей схеме: у каждой частицы измерялись наименьший  $d_{\min}$  и наибольший  $d_{\max}$  поперечные размеры, после чего диаметр каждой частицы вычислялся по формуле  $d_p = (d_{\min} + d_{\max})/2$ . Точность измерения составляла 0,27 мкм. Эксперимент состоял из нескольких серий, в каждой из которых задавались некоторые определенные значения напряжений  $U_{\omega}$ ,  $U_{\Delta}$  и частоты  $f$ . В каждой серии экспериментов с определенными значениями напряжений и частоты изучались размеры случайных 200 частиц.

Пролетая область коронного разряда, частицы приобретали положительный заряд и попадали в область между электродами 5 и 6, где они захватывались переменным полем электродов [13]. Для вывода захваченных между электродами 5 и 6 частиц из газового потока кольцевому электроду 7 прикладывался положительный потенциал  $U_{\Delta} = 0,5$  и 1 кВ. На рис. 2 представлен процесс вывода частиц из газового потока, электроды ловушки отмечены цифрой 1, цифрой 2 отмечена граница контейнера 4. Частицы, захваченные в газовом потоке за счет переменного и постоянного электрических полей, двигаются в направлении контейнера и, выходя за торцы электродов, осаждаются на предметном стекле, размещенном под электродами. После эксперимента измерялся размер частиц, осажденных на предметном стекле.

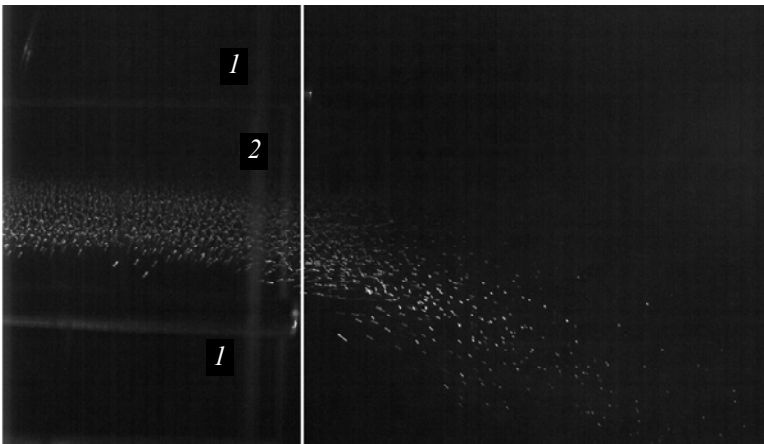


Рис. 2. Процесс удаления частиц из газового потока. 1 — электроды 5 и 6 (рис. 1), 2 — граница ловушки 2 и контейнера 4 на рис. 1. Вертикальная белая линия соответствует правым торцам электродов 5 и 6.  $U_{\omega} = 9,3$  кВ,  $f = 50$  Гц,  $U_{\Delta} = 0,5$  кВ

### Состав удаленных из газового потока частиц

В работе исследовались гистограммы распределений захваченных частиц по размерам для частот переменного напряжения  $f = 50, 100$  и  $200$  Гц и для разных амплитуд, а также исходное распределение частиц, инжектированных в установку. Соответствующие гистограммы представлены на рис. 3.

Обнаружен эффект сепарации частиц при значениях переменного напряжения  $U_{\omega} = 11,7$  кВ и частоте  $f = 200$  Гц, который выражается в наличии дополнительного пика в гистограмме распределения удаленных из газового потока частиц. Следует также отметить, что эффективность удаления частиц с размерами менее  $1$  мкм возрастает, что является достоинством данного метода по сравнению с традиционными.

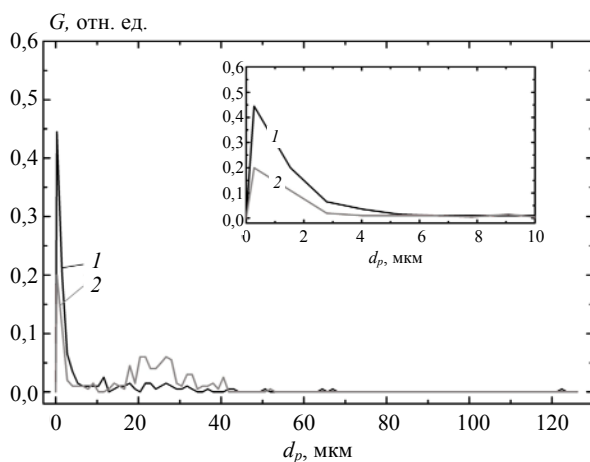


Рис. 3. Гистограммы исходного распределения частиц (1), инжектированных в установку, и распределения удаленных из газового потока частиц (2) при  $f = 200$  Гц,  $U_{\omega} = 11,7$  кВ,  $U_{\Delta} = 1$  кВ. На вставке показана область малых размеров частиц. Гистограммы строились для интервала размеров частиц от  $0,27$  до  $126$  мкм

### Заключение

Впервые продемонстрирована возможность с помощью динамических полей линейной квадрупольной ловушки выводить частицы из газового потока в широком диапазоне размеров частиц. Полученные результаты указывают на возможность подбора параметров устройства для селективного удаления частиц необходимого размера.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-50-00124.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Spyros N. P., Anthony S. Wexler, John H. Seinfeld // J. Phys. Chem. 1995. V. 99. No. 24. P. 9646.
2. John H. S., Spyros N. P. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. — Wiley, 2006.
3. Bruce T. D. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2003. V. 41. P. 241.
4. Kulkarni P., Baron P. A., Willeke K. Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications. — Wiley, 2011.
5. Пауль В. // УФН. 1990. Т. 160. № 12. С. 109.
6. D'yachkov L. G. // Technical Physics Letters. 2015. V. 41. No. 6. P. 602.
7. D'yachkov L. G. // High Temperature. 2015. V. 53. P. 613.
8. Zhukhovitskii D. I. // Phys. Rev. E. 2015. V. 92. 023108.
9. Zhukhovitskii D. I., Petrov O. F., Hyde T. W., et al. // New Journal of Physics. 2015. V. 17. No. 5. P. 053041.
10. Lapitsky D. S., Filinov V. S., Deputatova L. V., et al. // Contrib. Plasma Phys. 2013. V. 53. P. 450.
11. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., et al. // New Journal of Physics. 2013. V. 15. P. 043047.
12. Лапицкий Д. С., Филинов В. С., Депутатова Л. В. и др. // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 1. С. 3.
13. Lapitsky D. S., Filinov V. S., Vasilyak L. M., et al. // EPL. 2015. V. 110. P. 15001.

## Removal of charged micron-sized particles by a quadrupole altering electric field

*D. S. Lapitsky, R.A. Syrovatka, L. M. Vasilyak, V. S. Filinov, L. V. Deputatova,  
V. I. Vladimirov, and V. Ya. Pecherkin*

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

*Received October 22, 2015*

***For the first time, the contactless removal of particles from a gas flow in a wide range of particle sizes has been experimentally proved. The obtained results indicate the possibility of selective removal of particles of the required size by devices which use the alternating electric fields.***

PACS: 52.77.-j, 52.90.+z

*Keywords:* filters, gas cleaning, gas flow, particles separation, Paul trap.

### REFERENCES

1. N. P. Spyros, S. Wexler Anthony, H. Seinfeld John, *J. Phys. Chem.* **99**, 9646 (1995).
2. H. S. John and N. P. Spyros, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. (Wiley, 2006).
3. T. D. Bruce, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **41**, 241 (2003).
4. P. Kulkarni, P. A. Baron, and K. Willeke, *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications*. (Wiley, 2011).
5. V. Paul, *Phys. Usp.* **160** (12), 109 (1990).
6. L. G. D'yachkov, *Technical Physics Letters* **41**, 602 (2015).
7. L. G. D'yachkov, *High Temperature* **53**, 613 (2015).
8. D. I. Zhukhovitskii, *Phys. Rev. E.* **92**, 023108 (2015).
9. D. I. Zhukhovitskii, O. F. Petrov, T. W. Hyde, et al., *New Journal of Physics* **17**, 053041 (2015).
10. D. S. Lapitsky, V. S. Filinov, L. V. Deputatova, et al., *Contrib. Plasma Phys.* **53**, 450 (2013).
11. L. M. Vasilyak, V. I. Vladimirov, L. V. Deputatova, et al., *New Journal of Physics* **15**, 043047 (2013).
12. D. S. Lapitsky, V. S. Filinov, L. V. Deputatova, et al., *High Temperature* **53**, 3 (2015).
13. D. S. Lapitsky, V. S. Filinov, L. M. Vasilyak, et al., *EPL* **110**, 15001 (2015).