

УДК 53.043, 001.51, 534-13, 534.014.2

Эффективные силы, действующие на заряженную макрочастицу в линейной ловушке Пауля

Д. С. Лапицкий

В статье представлены результаты расчета эффективных сил увлечения, действующих на заряженную частицу в линейной ловушке Пауля в воздухе при нормальных условиях. Определены зоны внутри ловушки, где происходит захват и удержание заряженных частиц, исследована зависимость зон удержания от параметров частицы и ловушки.

PACS: 07.05.Tr; 46.40.Ff; 45.50.Dd

Ключевые слова: переменное электрическое поле, осцилляции, сила Гапонова-Миллера, сила увлечения, эффективная сила.

Введение

Теория движения нерелятивистской заряженной частицы в переменном электрическом поле была разработана в [1, 2]. Движение частицы в переменном электрическом поле можно разделить на две составляющие: быстрые осцилляции под действием переменного поля и медленное движение. Другими словами, совершая осцилляции в переменном электрическом поле, частица может дрейфовать в некотором определенном направлении, т. е. положение, относительно которого частица совершает колебания, со временем может смещаться. Сила, за счет которой происходит этот дрейф, называется силой Гапонова-Миллера [3] или же эффективной силой, направление которой не зависит от знака заряда частицы. Обобщение теории движения заряженных частиц (пылевых частиц) в переменном электрическом поле в газовой среде при наличии силы трения, пропорциональной скорости частиц, было получено в [4].

Эффект захвата заряженных частиц переменными электрическими полями используется в ловушках Пауля [5]. Переменное электрическое поле в ловушке создается переменным напряжением определенной частоты, подаваемым на электроды ловушки. Это переменное электрическое поле может привести к появлению как внутри, так и на некотором удалении от ловушки областей, куда будут стремиться частицы (т. н. псевдопотенциальных ям), и областей, откуда частицы будут выталкиваться благодаря наличию псевдопотенциальных барьеров. В научной литературе довольно часто появляются работы, посвященные

частицам в подобных потенциальных ямах или ловушках [6—13]. Однако целый ряд вопросов пока остается ещё открытым.

Целью данной работы является исследование эффективных сил, действующих в воздушной среде на заряженную частицу в переменных электрических полях в линейной ловушке Пауля для определения зон псевдопотенциальных ям и барьеров внутри ловушки. В работе используется подход, разработанный ранее в [3], но использованный теперь для выявления эффективных сил, действующих на заряженную частицу в линейной ловушке Пауля.

Эффективные силы в линейной ловушке Пауля

Схема линейной ловушки Пауля представлена на рис. 1. В данной работе рассматривалась ловушка, состоящая из четырех цилиндрических электродов, расположенных параллельно центральной оси y . Оси электродов расположены по углам квадрата шириной $L_b = 2$ см. Радиус электродов ловушки составлял $R_1 = 1$ мм, длина электродов $L = 10$ см. На электроды ловушки подавалось переменное напряжение со сдвигом по фазе на π между соседними электродами. Переменное напряжение на электродах 1 было $U_\omega \sin(\omega t + \pi)$ и $U_\omega \sin(\omega t)$ на электродах 2, где $\omega = 2\pi f$, f — частота переменного напряжения, U_ω амплитуда переменного напряжения.

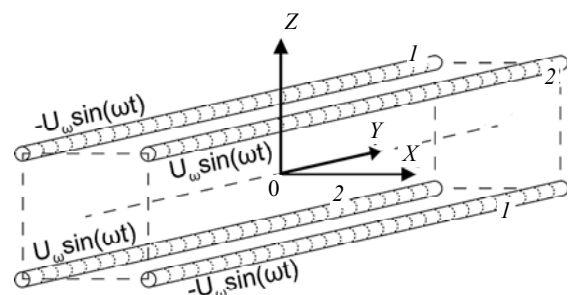


Рис. 1. Схема линейной ловушки Пауля

Лапицкий Дмитрий Сергеевич, научный сотрудник. Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН). Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2. Тел. 8 (916) 721-30-03. E-mail: dmitrucho@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 октября 2015 г.

© Лапицкий Д. С., 2015

Для нахождения эффективной силы, действующей на частицу, рассмотрим уравнение её движения в воздухе под действием переменного электрического поля, которое имеет вид:

$$m_p \ddot{\vec{r}} = m_p \vec{g} + \sum_i \vec{F}_i(r) + 6\pi\eta r_p \dot{\vec{r}}, \quad (1)$$

где m_p — масса частицы, $\ddot{\vec{r}}$, $\dot{\vec{r}}$ и \vec{r} — соответственно ускорение, скорость и вектор частицы, g — ускорение свободного падения, $F_i(r)$ — электрическая сила, действующая на частицу со стороны электрода i , η — динамическая вязкость воздуха ($\eta = 18$ мкПа·с), r_p — радиус частицы.

Для того чтобы рассчитать силу взаимодействия электродов ловушки с заряженной частицей было сделано предположение, что электроды ловушки окружены заземленным цилиндрическим электродом радиуса $R_2 = 25$ см, который значительно больше расстояния между осями электродов L_b . Зная напряжение U , подаваемое на электрод i ловушки, можно рассчитать заряд электрода в предположении, что электрод ловушки и цилиндрическая обкладка образуют цилиндрический конденсатор. Сила взаимодействия заряженной частицы с электродом ловушки i может быть представлена как сумма сил кулоновского взаимодействия точечных зарядов, равномерно распределенных вдоль электрода ловушки, с заряженной частицей в предположении, что электрод расположен на оси заземленного цилиндра радиуса R_2 [11]:

$$\vec{F}_e(r) = \sum_i \frac{LUq_p(\vec{r}_i - \vec{r})}{2N \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)(r_i - r)^3},$$

где U — напряжение, подаваемое на электрод i ($U_\omega \sin(\omega t + \pi)$ и $U_\omega \sin(\omega t)$), q_p — заряд частицы, N — количество точечных зарядов электрода i , \vec{r}_i — радиус-вектор точечного заряда электрода.

Для расчета эффективной силы, действующей на заряженную частицу, уравнение (1) должно быть решено при начальных условиях (r_0, \dot{r}_0) , и должна быть найдена скорость частицы как функция времени и начальных координат $v_p(t, r_0)$ [3]. Для нахождения скорости частицы уравнение (1) решалось методом Рунге-Кутты порядка $N_{rk} = 4$.

Рассмотрим кинетическую энергию частицы, движущейся со скоростью $v(t, r_0)$. Усредненная кинетическая энергия частицы за период колебаний электрического поля ($T = 1/f$) представлена следующим уравнением:

$$\overline{W(r_0)} = \frac{1}{2} m_p \frac{\int_0^T v_p(t, r_0)^2 dt}{T},$$

а эффективная сила, действующая на заряженную частицу, может быть вычислена по формуле

$$F_{eff} = -\frac{d}{dr} \overline{W(r_0)}.$$

Уравнение (1) решалось для каждой проекции скорости частицы $v_p(t, r_0)$ на оси x и y : при расчете проекции скорости на одну из этих осей проекция скорости на другую, а также проекция на ось z предполагались равными нулю.

Были приняты следующие начальные условия: начальная скорость частицы $\dot{r}_0 = 0$, а начальное положение частицы \vec{r}_0 представлено смещениями Δ_x , Δ_y и Δ_z от начала координат (точка 0 на рис. 1, в расчетах принято $\Delta_z = 0,5$ см). Таким образом, движение частицы в ловушке предполагалось только вдоль одной из осей, x или y , в то время как положение частицы вдоль других осей было неизменным.

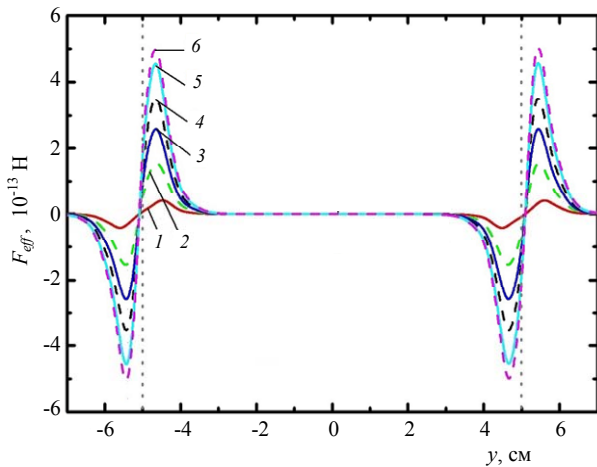
Расчеты проводились для частицы плотностью $\rho_p = 3990$ кг/м³ с зарядом $q_p = 10^5 e$ при различных начальных смещениях Δ_x и Δ_y . Амплитуда переменного напряжения при расчетах составляла $U_\omega = 1$ кВ.

Результаты расчетов эффективной силы вдоль оси y представлены на рис. 2, *a*, где ось y направлена слева направо. Приведены эффективная сила F_{eff} в зависимости от координаты y для разных радиусов частицы r_p . На рис. 2 показано как частица в ловушке дрейфует под действием эффективной силы влево при отрицательном значении силы и вправо — при положительном. Это означает, что захват частицы происходит в зоне, где эффективная сила меняет свой знак с положительного на отрицательный. Вертикальные пунктирные линии соответствуют границам ловушки.

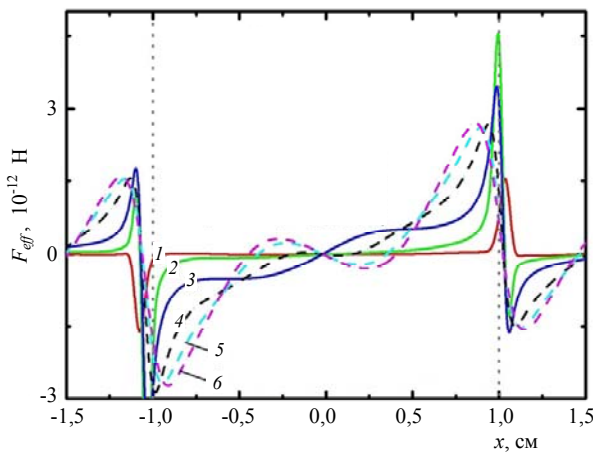
На рис. 2, *a* максимальное значение F_{eff} пропорционально радиусу частицы, а зоны положительного и отрицательного значений F_{eff} заходят за границы ловушки, что означает наличие области порядка 1 мм за ловушкой, где возможен захват частиц внутрь ловушки.

Сила F_{eff} поперек электродов ловушки представлена на рис. 2, *b*, где ось x направлена слева направо. Продемонстрировано, что ловушка не способна захватить малую частицу радиуса 2 мкм при низких частотах переменного напряжения (сила внутри ловушки меняет знак с отрицательного на положительный, что соответствует выталкиванию частицы из ловушки). Так, при частоте меньше 50 Гц ловушка стремится выбросить частицы с радиусами меньше 5 мкм. Чтобы ловушка стала их захватывать, необходимо повышать частоту переменного напряжения и при частоте 100 Гц, например, происходит уже захват этих частиц. На рис. 2, *b* видно, что за границами ловушки есть зоны, где знак эффективной силы из-

меняется с положительного на отрицательный, это указывает на возможность захвата частицы на некотором удалении от нее.



а



б

Рис. 2. Поведение эффективной силы F_{eff} в разных условиях численного эксперимента: а) вдоль оси y для разных радиусов частицы, где кривая 1 соответствует $r_p = 1$ мкм, 2 — 3 мкм, 3 — 5 мкм, 4 — 7 мкм, 5 — 10 мкм, 6 — 15 мкм, $\Delta_x = \Delta_z = 0,5$ см, частота $f = 50$ Гц; б) вдоль оси x для разных частот переменного напряжения, где кривая 1 соответствует $f = 10$ Гц, 2 — 25 Гц, 3 — 50 Гц, 4 — 100 Гц, 5 — 150 Гц, 6 — 200 Гц, $r_p = 2$ мкм, $\Delta_y = 0$ см, $\Delta_z = 0,5$ см

Заключение

В работе предложена схема расчета эффективной силы, действующей в воздухе внутри ловушки Пауля на заряженную частицу. Исследована сила увлечения, действующая на заряженную частицу в линейной ловушке Пауля. Поведение силы в ловушке нелинейно и зависит от размера частицы, ее заряда, массы, а так же от параметров ловушки, а именно: геометрии электродов, напряженности и частоты переменного поля, что влечет появление множества зон псевдопотенциальных ям и барьеров как внутри, так и вне ловушки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-08-02835 а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапонов А. В., Миллер М. А. // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. № 2. С. 242.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. — М.: Наука. 1988.
3. Болотовский Б. М., Серов А. В. // УФН. 1994. Т. 164. № 5. С. 545.
4. Волков В. Н., Крылов И. А. // Межвуз. сб. научн. тр. Иван. энерг. ин-т им. В. И. Ленина. 1976. С. 76.
5. Пауль В. // УФН. 1990. Т. 160. № 12. С. 109.
6. D'yachkov L. G. // Technical Physics Letters. 2015. V. 41. P. 602.
7. D'yachkov L. G. // High Temperature. 2015. V. 53. P. 613.
8. Zhukhovitskii D. I. // Phys. Rev. E. 2015. V. 92. P. 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. Ланицкий 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.

Effective forces acting a charged particle in the linear Paul trap

D. S. Lapitsky

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

Received October 23, 2015

The results of calculation of effective forces acting on a charged particle in the linear Paul trap in air are presented. The zones of confinement in the trap are found as the dependencies on particle and trap parameters.

PACS: 07.05.Tp; 46.40.Ff; 45.50.Dd

Keywords: alternating electric field, oscillations, Gaponov-Miller force, dreg force, effective force.

REFERENCES

1. A. V. Gaponov and M. A. Miller, JETP **34**, 242 (1958).
2. L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Mechanics* (Nauka, Moscow, 1988) [in Russian].
3. B. M. Bolotovskii and A. V. Serov, Phys. Usp. **164**, 545 (1994).
4. V. N. Volkov and I. A. Krylov, Sborn. Nauch. Trud. Ivan. Energ. Institut., 76 (1976).
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).