

УДК 533.951

## Взаимодействие заряженных частиц с электрическим полем, имеющим прыгающую фазу

Д. Г. Андреев, Н. С. Ерохин

*Представлен анализ взаимодействия заряженных частиц с электрическим полем, имеющим прыгающую фазу. Показана возможность генерации потоков быстрых частиц в этом процессе с ростом их энергии на несколько порядков величины. Рассмотрена зависимость динамики ускорения от параметров стохастически прыгающей фазы электрического поля и определены оптимальные условия высокой эффективности данного взаимодействия с генерацией сверхтепловых заряженных частиц.*

PACS: 52.40Db, 52.80.Pi

*Ключевые слова:* электрическое поле, стохастически прыгающая фаза, энергия заряда, амплитуда колебаний, случайное распределение, сверхтепловые частицы, пробой газов.

### Введение

Одним из важных вопросов плазменной электроники является исследование эффективности взаимодействия электромагнитных волн, имеющих стохастические характеристики, с веществом [1—4]. Данная проблема представляет интерес для объяснения механизмов генерации потоков ускоренных частиц в лабораторной и космической плазме, включая плазменную астрофизику, а также околоземное пространство.

Согласно экспериментальным работам [2—4], использование микроволнового излучения со стохастически прыгающей фазой позволяет реализовать эффективный бесстолкновительный нагрев электронов и пробой газа при меньших напряженностях электрического поля, наблюдать прохождение этого излучения через плазму с плотностью выше критического значения (просветление волновых барьеров). Кроме того, возможны процессы образования немаксвелловских хвостов ускоренных электронов и более эффективного возбуждение резонаторов.

Настоящее сообщение посвящено исследованию (на основе численных расчетов) взаимодействия заряженных частиц с электрическим полем, имеющим прыгающую фазу, и анализу эффективности этого взаимодействия в зависимости от исходных параметров. Путем введения нормированных переменных данная задача сводится к решению канонического уравнения осциллятора с внешней силой заданной частоты, имеющей в простейшем варианте единичную безразмерную амплитуду. При постоянной фазе поля это соответствует единичной амплитуде колебаний скорости заряда. Параметрами взаимодействия являются характерный интервал времени между скачками фазы, степень размытости скачка фазы и типичная амплитуда скачков. В частности, ниже полагалось, что величина скачка фазы является случайной величиной, равномерно распределенной в интервале  $(-\pi, \pi)$ . Рассмотрены различные варианты для интервала времени между скачками фазы, например, нецелое число полупериодов электрического поля и др. Размытость скачка фазы моделировалась ступенькой, имеющей малую, но конечную толщину.

Проведенные расчеты показали, что при числе скачков порядка тысяч и более возможны варианты сильного ускорения заряда, а именно, безразмерная амплитуда его скорости в стохастическом поле может возрастать до десятков и сотен. Следовательно, за счет прыгающей фазы максимум энергии заряженной частицы при ее взаимодействии с осциллирующим электрическим полем может увеличиться в сотни, тысячи и более раз. Показано также, что имеются оптимальные условия

Андреев Дмитрий Геннадиевич<sup>1</sup>, аспирант.

Ерохин Николай Сергеевич<sup>1,2</sup>, профессор.

<sup>1</sup>Российский университет дружбы народов.

Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

E-mail: andemityu@gmail.com

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН.

Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.

Тел. (495) 333-41-00. E-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2011 г.

для реализации такого эффективного взаимодействия.

### Основные уравнения и результаты расчетов

Некоторые качественные особенности движения частицы в поле волны являются достаточно известными [5, 6]. Например, в поле электромагнитной волны, поляризованной по кругу, частица движется по окружности, плоскость которой перпендикулярна направлению распространения волны. В поле однородной линейно поляризованной поперечной волны заряд движется по синусоидальной кривой. Наиболее простая модель описания (в бесстолкновительном случае) стохастического ускорения частиц основана на следующем одномерном уравнении для скорости заряженной нерелятивистской частицы  $v(t)$ :

$$dv/dt = qE / m, \quad (1)$$

где  $q$ ,  $m$  — заряд и масса частицы, соответственно;

$$E(t) = E_0 \cos [\omega t + \varphi(t)];$$

$E_0$  — амплитуда колебаний электрического поля;

$\omega$  — частота;

$\varphi(t)$  — стохастически прыгающая фаза.

Удобно перейти к безразмерным переменным  $\tau = \omega t$ ,  $v = v_0 u(\tau)$  с характерным значением осцилляторной скорости заряда  $v_0 = qE_0 / (m\omega)$ . Из (1) имеем следующее уравнение для безразмерной скорости  $u(\tau)$

$$du / d\tau = \cos [\tau + \varphi(\tau)]. \quad (2)$$

Его решение определяется формулой

$$u(\tau) = \int_0^\tau d\tau' \cos[\tau' + \varphi(\tau')]. \quad (3)$$

Следовательно, в случае постоянной фазы  $\varphi(\tau) = \text{const}$  амплитуда колебаний безразмерной скорости заряда в электрическом поле равна единице.

Рассмотрим динамику скорости заряда  $u(\tau)$  в случае стохастически прыгающей фазы  $\varphi(\tau)$ . В численных расчетах уравнения (3) полагалось, что величина скачка фазы  $\delta\varphi = \theta$  является случайной величиной, равномерно распределенной в интервале  $(-\pi, \pi)$ . Если скачки фазы электрического поля происходят внезапно через интервал времени  $\beta$ , тогда на интервале времени  $n\beta < \tau < (n+1)\beta$  для скорости заряда из (3) получаем следующую рекуррентную формулу  $u(\tau) = u_{n-1} + \sin(\tau - n\beta + \theta_n) - \sin(\theta_n)$ , где  $u_{n-1} \equiv u(n\beta)$ . При анализе были рассмотрены различные варианты для интервала времени между скачками фазы, в частности,  $\beta = 7\pi / 4$ ,  $3\pi / 2$ ,  $5\pi$ ,  $6\pi$ . Для размытых скачков изменение фазы поля моделировалась ступенькой конечной толщины

$$\delta\varphi_n(\tau) = 0,5 \cdot \theta_n [1 + g_n(\tau)], \quad (4)$$

$$g_n(\tau) = (\tau - \tau_n) / [\varepsilon^2 + (\tau - \tau_n)^2]^{1/2}.$$

Здесь параметр  $\varepsilon$  определяет размытость скачка фазы и полагался малым, т. е.  $\varepsilon \ll \beta$ .

Если скачки фазы электрического поля происходят внезапно, тогда на интервале времени  $\tau_n = n\beta < \tau < \tau_{n+1} = (n+1)\beta$  из (4) для скорости получаем следующую рекуррентную формулу

$$u(\tau) = u_{n-1} + \sin(\tau + \varphi_n) - \sin(\tau_n + \varphi_n). \quad (5)$$

Причем скорость  $u = u_{n-1}$  для момента времени  $\tau = n\beta$ , а перед  $(n+1)$  скачком фазы, когда  $\tau = n\beta + \beta$ , из выражения (5) следует, что

$$u_{n+1} = u_{n-1} + \sin(\beta + \Psi_n) - \sin(\Psi_n), \quad (6)$$

где  $\Psi_n = n\beta + \varphi_n$ . Формула (6) дает преобразование скорости через интервал времени  $\beta$  с учетом скачков фазы. Заметим, что в момент резкого скачка фазы электрического поля скорость частицы  $u = d\xi / d\tau$  и ее смещение  $\xi$  непрерывны. На достаточно протяженном интервале времени рекуррентное соотношение (6) выявляет существенный набор энергии частицы за счет случайных скачков фазы. Здесь следует отметить, что наши расчеты показали — сильное ускорение частицы электрическим полем со стохастически прыгающей фазой происходит при достаточно большом числе скачков, порядка нескольких тысяч и более.

Изложим результаты расчетов. Был взят вариант последовательности резких скачков с величиной скачка из области  $-\pi < \theta < \pi$  через интервал времени  $\beta = 5\pi$ . Всего было рассмотрено  $10^4$  скачков. График скорости  $u(\tau)$  приведен на рис. 1. В данном случае максимум скорости частицы  $u_{\max} \approx 165,75$  был достигнут при  $\tau = 64368$ .

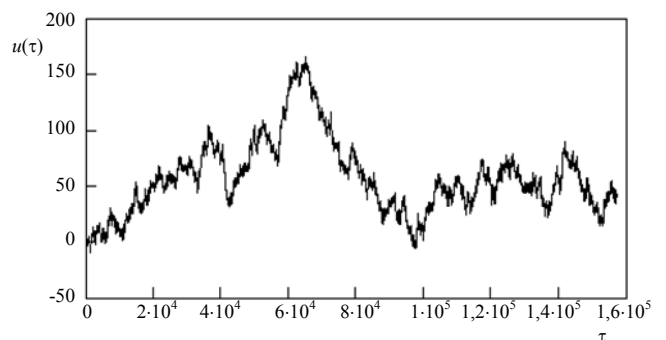


Рис. 1. Динамика скорости заряда  $u(\tau)$  в случае резких случайных скачков фазы поля с величиной скачка из области  $-\pi < \theta < \pi$  через интервал времени  $\beta = 5\pi$

Для другого варианта интервала между резкими скачками фазы поля  $\beta = 11,17$  результат расчетов показан на рис. 2. Здесь максимум скорости частицы  $u_{\max} \approx 104,24$  был при  $\tau = 107370$ , а минимум скорости  $u_{\min} \approx -64,917$  имел место при  $\tau = 39363$ .

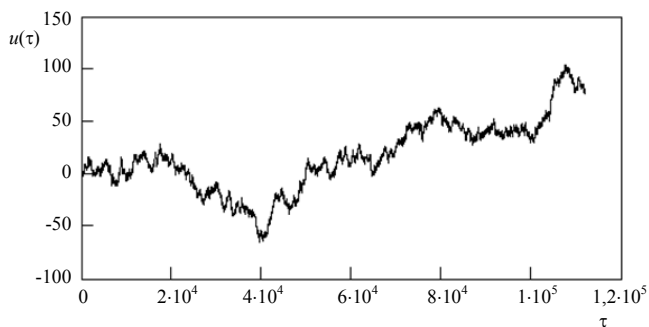


Рис. 2. Динамика скорости заряда  $u(\tau)$  при резких случайных скачках фазы поля с величиной скачка из области  $-\pi < \theta < \pi$  через интервал времени  $\beta = 11,17$

Если взять  $\beta = 8,11$ , что близко к  $5\pi / 2$ , то за исключением сравнительно малого начального интервала времени ускорение заряда происходит в обратном направлении. На рис. 3 представлен график скорости для данного случая. Теперь максимум скорости частицы  $u_{\max} \approx 34,227$  достигается при  $\tau \approx 2238$ , а минимум скорости  $u_{\min} \approx -108,57$  имеет место в конце интервала численных расчетов при  $\tau \approx 81068$ . Как видно из графика, в среднем ускорение частицы идет в направлении отрицательных  $\xi$ .

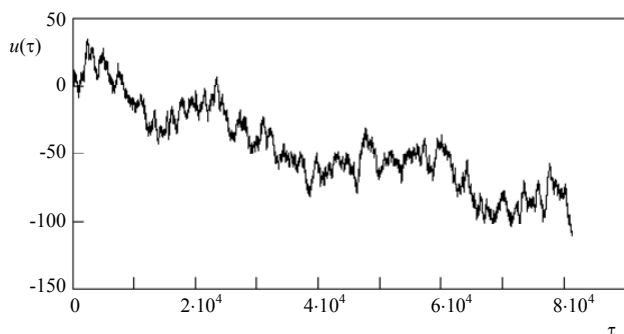


Рис. 3. График скорости заряда  $u(\tau)$  при резких случайных скачках фазы поля  $(-\pi < \theta < \pi)$  через интервал времени  $\beta = 8,11$

Интересен случай скачков фазы  $\varphi(\tau)$  через четное число периодов поля. Так, расчеты для случая  $\beta = 6\pi$  с величиной скачка из области  $-\pi < \theta < \pi$ , приведенные на рис. 4, показывают практически полное отсутствие ускорения заряда электрическим полем в этой ситуации.

Был рассмотрен случай скачков фазы из интервала  $-\pi < \theta < \pi$  при случайных моментах времени этих скачков. На рис. 5 показан график скорости частицы для 50 000 скачков фазы при выборе интервала между скачками случайным числом из интервала  $5\pi < \beta < 7\pi$ . Как видим, здесь также наблюдается весьма сильное ускорение частиц электрическим полем со стохастически прыгающей фазой.

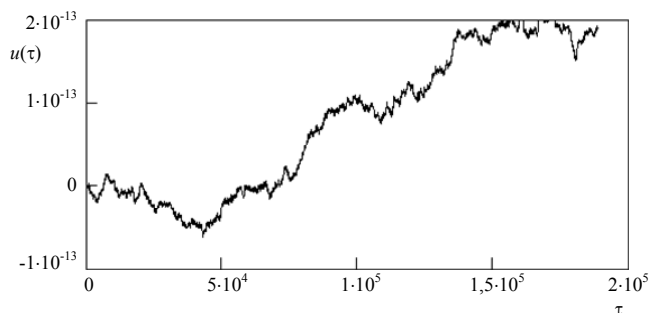


Рис. 4. График скорости заряда  $u(\tau)$  при резких случайных скачках фазы поля  $(-\pi < \theta < \pi)$  через интервал времени  $\beta = 6\pi$

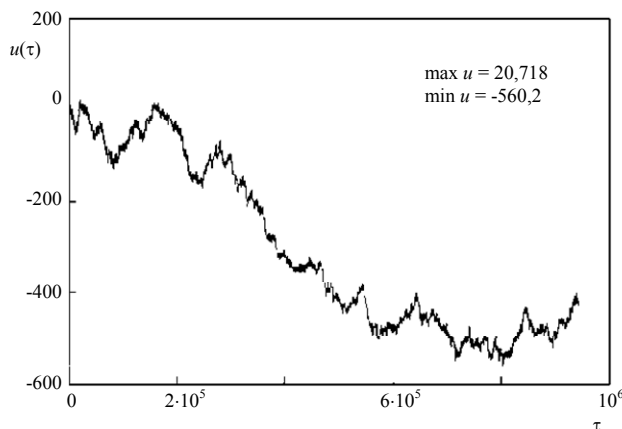


Рис. 5. График скорости частицы для 50 000 скачков фазы при выборе интервала между скачками случайным числом из интервала  $5\pi < \beta < 7\pi$

Было рассмотрено ускорение частиц при их взаимодействии с продольной волной, имеющей стохастически прыгающую фазу. Начальная энергия частицы была значительно меньше фазовой скорости волны (порядка тепловой скорости). Расчеты показали возможность сильного ускорения частиц, динамика скорости зарядов в целом была аналогична описанной выше. Результаты детального анализа этого варианта стохастического ускорения будут изложены в последующей работе. В заключение отметим, что некоторые варианты взаимодействия заряженных частиц с электрическим полем, имеющим стохастически прыгающую фазу, были ранее рассмотрены в работе [7].

### Выводы

1. На основе численных расчетов выполнен анализ взаимодействия заряженных частиц с электрическим полем, имеющим прыгающую фазу, включая исследование эффективности этого взаимодействия в зависимости от исходных параметров задачи.

2. Расчеты показали, что при числе скачков порядка тысяч возможны варианты сильного ускорения заряда: амплитуда его скорости в стохастическом поле может достигать десятков и сотен.

Следовательно, за счет прыгающей фазы максимум энергии заряженной частицы при ее взаимодействии с осциллирующим электрическим полем может увеличиться в сотни, тысячи и более раз.

3. Имеются оптимальные условия для такого эффективного взаимодействия. Наиболее эффективно при фиксированном интервале между скачками фазы частицы ускоряются при  $\beta \approx (2m + 1)\pi$ , где  $m$  — целое число. Если же  $\beta \approx 2m\pi$ , то ускорение частиц электрическим полем со стохастически прыгающей фазой отсутствует. Сильное ускорение заряженных частиц возможно как при фиксированном интервале между скачками фазы, так и в случае, когда этот интервал является случайной величиной.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы ОФН-11 Отделения физических наук РАН, проект 4.4.*

#### Литература

1. Файнберг Я. Б., Басс Ф. Г., Шапиро В. Д. // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. № 1(7). С. 329.
2. Карась В. И., Файнберг Я. Б., Алисов А. Ф. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 9. С. 810.
3. Карась В. И., Алисов А. Ф., Артамошкин А. М. и др. // Вопросы атомной науки и техники, сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2006. № 5. С. 54.
4. Загребельный И. А., Марков П. И., Подобинский В. О. // Там же. 2008. № 4. С. 195.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — М.: Наука, 1973.
6. Болотовский Б. М., Серов А. В. // УФН. 2003. Т. 173. № 6. С. 84.
7. Андреев Д. Г. // Международная конференция МСС-09 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность": Сб. трудов. — М.: Изд-во "URSS". 2009. С. 491.

## Interaction of charged particles with the electric field having a jumping phase

*D. G. Andreev<sup>1</sup>, N. S. Erokhin<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup>The Peoples' Friendship University of Russia,  
6 Miklukho-Maklay str., Moscow, 117198, Russia  
E-mail: andemity@gmail.com

<sup>2</sup>Space Research Institute of RAS,  
84/32 Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia  
E-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru

*On the basis of numerical calculations, the analysis of interaction of the charged particles with the electric field having a stochastic jumping phase has been made. Possibility of generation of fast particles streams in this process with large growth of their energy is shown. Dependence of acceleration dynamics on parameters of stochastic jumping phase of the electric field is considered and optimum conditions of high efficiency of the given interaction with generation of the superthermal charged particles are defined.*

PACS: 52.40Db, 52.80.Pi

*Keywords:* electric field, stochastic jumping phase, charge energy, oscillation amplitude, random distribution.

Bibliography — 7 references.

*Received September 25, 2011*

\* \* \*