

STUDY OF SURFATRON ACCELERATION OF ELECTRONS IN SPACE PLASMA FOR DIVERSE LONGITUDINAL PARTICLE MOMENTUM

**Nikolay Erokhin¹, Rumen Shkevov², Nadezhda Zolnikova¹, Alex Erokhin¹,
Ludmila Mikhailovskaya¹**

¹Space Research Institute – Russian Academy of Sciences

²Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: shkevov@space.bas.bg, nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Invited paper

Key words: Surfatron acceleration of the particle, relativistic particles momentum, constant of motion, particles trapping, space plasma, electromagnetic waves, phase plane, nonlinear equation, waves packet, longitudinal particle momentum.

Abstract: The dynamics of surfatron acceleration of electrons by electromagnetic wave in space plasma, depending on the momentum of the particle along the external magnetic field (longitudinal momentum) was described. On the basis of the nonlinear, non stationary, second order differential equation for the phase of the wave on the electron trajectory, numerical calculations were made for different values of the longitudinal momentum of the particle. The numerical results show that with the increase of the value of the longitudinal electron momentum, the favorable initial phase for capturing particles in the surfatron acceleration mode, remains unchanged and strong acceleration takes place. Increasing the longitudinal momentum of the electron does not change the growth rate of its energy, which does not depend on the amplitude of the wave's electric field. The amplitude of the wave's electric field determines the position of the bottom of the effective, non-stationary, potential well in which the electron is captured. An analytical approximation of the energy of the particle during its ultrarelativistic surfatron acceleration by the electromagnetic wave was done.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕРФОТРОННОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСАХ ЧАСТИЦЫ

**Николай Ерохин¹, Румен Шкевов², Надежда Зольникова¹, Алекс Ерохин¹,
Людмила Михайловская¹**

¹Институт космических исследований – Российская академия наук

²Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru, shkevov@space.bas.bg

Ключевые слова: Серфотронное ускорение частицы, импульс релятивистской частицы, интеграл движения, захват частиц, космическая плазма, электромагнитные волны, фазовая плоскость, нелинейное уравнение, волновой пакет, продольный импульс частицы.

Аннотация: Рассмотрена динамика серфотронного ускорения электронов электромагнитной волной в космической плазме в зависимости от импульса частицы вдоль внешнего магнитного поля (продольного импульса). На основе нелинейного, нестационарного, дифференциального уравнения второго порядка для фазы волны на траектории электрона проведены численные расчеты для различных значений продольного импульса частицы. Результаты численных расчетов показывают, что при увеличении величины продольного импульса электрона значение благоприятной (для захвата частицы в режим серфотронного ускорения) начальной фазы не меняется и имеет место сильное ускорение. Увеличение продольного импульса электрона не меняет темпа роста его энергии, который не зависит от амплитуды электрического поля волны. Амплитуда же электрического поля волны определяет положение дна эффективной, нестационарной, потенциальной ямы, в которую захвачен электрон. Разработана аналитическая аппроксимация энергии частицы при ее ультрарелятивистском, серфотронном ускорении электромагнитной волной.

Введение

Исследование процессов формирования потоков быстрых частиц относится к числу актуальных задач физики космической плазмы. В частности, оно представляет большой интерес для проблемы генерации космических лучей в астрофизике. Это связано с тем, что серфинг зарядов на электромагнитных волнах, рассматривавшийся ранее, например, в работах [1-10], является одним из механизмов генерации потоков ультррелятивистских частиц. При этом для корректных оценок количества и максимальной энергии ускоренных частиц, их энергетических спектров, характерного размера области ускорения требуется детальный анализ условий захвата заряженных частиц в режим серфотронного ускорения, определение благоприятных (для захвата заряженных частиц в режим ультррелятивистского ускорения) фаз волны и скоростей зарядов, эффективности ускорения частиц при взаимодействии зарядов с пространственно локализованными волновыми пакетами. В итоге задача является многопараметрической и требует большой объем расчетов. На основе нелинейных численных расчетов рассмотрены захват электронов и их сильное серфотронное ускорение электромагнитной волной, распространяющейся в космической плазме поперек слабого внешнего магнитного поля \mathbf{H}_0 , для различных значений продольного (вдоль магнитного поля \mathbf{H}_0) импульса частицы.

Анализ на основе численных расчетов показал, что для амплитуд волны выше порогового значения при благоприятной для серфинга начальной фазе волны на траектории электрона и выполнении черенковского резонанса захват частицы сразу в режим серфинга не зависит от величины безразмерного, продольного импульса электрона $h = \gamma \beta_z$ (интеграл движения). В расчетах параметр h менялся в диапазоне (1 – 100) при неизменном начальном значении фазы волны на траектории частицы $\Psi(0)$. Диапазон благоприятных для захвата электрона в режим серфинга значений фаз $\Psi(0)$ оказался достаточно широким. Получены асимптотики компонент импульса, скорости и энергии ускоряемой частицы при большом (на порядок) ее росте, обсуждается их зависимость от амплитуды волны.

Таким образом в пространстве импульсов частиц область их захвата в режим серфинга на электромагнитной волне оказывается достаточно большой.

Постановка задачи и результаты численных расчетов.

На основе численных расчетов нелинейного, нестационарного уравнения для фазы волнового пакета Ψ на несущей частоте исследован захват слабoreлятивистских электронов в режим сильного серфотронного ускорения пакетом электромагнитных волн, распространяющимся в плазме поперек внешнего магнитного поля (вдоль оси x). Внешнее магнитное поле \mathbf{H}_0 направлено вдоль оси z .

Ниже рассматривается случай частоты волны ω из области верхнего гибридного резонанса при $\omega_{He} / \omega = u < 1$, где ω_{He} циклотронная частота нерелятивистских электронов плазмы. Фазовая скорость электромагнитной волны меньше скорости света в вакууме для следующей области параметра безразмерной плотности плазмы $v = (\omega_{pe} / \omega)^2 : 1 - u^2 < v < 1$, ω_{pe} ленгмюровская частота электронов плазмы. Захват зарядов в режим серфинга происходит при поле волны выше некоторого критического значения т.е., для $\sigma = e E_0 / m_e c \omega > u \gamma_p = u / (1 - \beta_p^2)^{1/2}$, $\beta_p = \omega / c k$. При численных расчетах серфинга электронов задачу упростим пренебрегая вихревыми компонентами волновых полей E_y, H_z . Согласно расчетам их учет не существен. Нелинейные эффекты взаимодействия ускоряющей волны с плазмой малы, если амплитуда волны E_0 значительно ниже характерного поля релятивистской нелинейности т.е. при выполнении условия $\sigma^2 \ll 1$. Рассмотрим релятивистские уравнения движения для импульса ускоряемого электрона \mathbf{p}

$$(1) \quad dp_x / dt = -e E_x - e v_y (H_0 + H_z) / c, \quad dp_z / dt = 0, \quad p_z = \text{const}, \\ dp_y / dt = -e E_y + e v_x (H_0 + H_z) / c$$

Для анализа уравнений (1) удобно ввести безразмерные переменные $\tau = \omega t$, $\xi = k x$ и безразмерную скорость $\beta = \mathbf{v} / c$. Отметим, что $\beta_x = \beta_p [1 - (d\Psi / d\tau)]$, а импульс электрона равен $\mathbf{p} = m c \gamma \beta$, где $\gamma = 1 / (1 - \beta^2)^{1/2}$ - релятивистский фактор частицы. В итоге в безразмерных переменных уравнения движения электронов (1) принимают вид:

$$(2) \quad d(\gamma \beta_x) / d\tau = -\sigma \cos \Psi - u \beta_y, \quad d(\gamma \beta_z) / d\tau = 0,$$

$$d(\gamma \beta_y) / d\tau = u \beta_x, \quad d\gamma / d\tau = -\sigma \beta_x \cos \Psi.$$

Используя (2) находим интегралы движения для ускоряемого электрона

$$(3) \quad J = \gamma \beta_y + u \beta_p (\Psi - \tau) = \text{const}, \quad h = \gamma \beta_z = \text{const}.$$

Величина J определяется значениями $g = \gamma(0) \beta_y(0)$ и $\Psi(0)$. С учетом (3) получаем релятивистский фактор γ и компоненту скорости заряда вдоль волнового фронта β_y

$$(4) \quad \gamma = \{ 1 + h^2 + [J + u \beta_p (\tau - \Psi)]^2 \}^{1/2} / (1 - \beta_x^2)^{1/2},$$

$$\beta_y = [J + u \beta_p (\tau - \Psi)] / \gamma.$$

Анализ ускорения зарядов проводится на основе вытекающего из (2)-(4) нелинейного нестационарного уравнения для фазы волны на траектории электрона

$$(5) \quad d^2 \Psi / d\tau^2 - [\sigma (1 - \beta_x^2) / \gamma \beta_p] \cos \Psi - (u \beta_y / \gamma \beta_p) = 0.$$

Для решения (5) начальные данные берем в виде $\Psi(0) = \Psi_0$, $\Psi_\tau(0) = a$. Соответственно имеем $\beta_x(0) = \beta_p (1 - a)$. Введем компоненты безразмерного импульса частицы $g_x = \gamma \beta_x$, $g_y = \gamma \beta_y$. Нелинейное уравнение (5) решалось численно. Для достаточно больших времен ускорения электрона численное решение должно выходить на следующие асимптотики для компонент скорости и релятивистского фактора частицы $\gamma(\tau) \approx u \beta_p \gamma_p \tau$, $\beta_x \approx \beta_p$, $\beta_y \approx 1 / \gamma_p$.

Таким образом темп ускорения постоянен и не зависит от амплитуды волны σ , определяющей асимптотику функции $\sigma < \beta_x \cos \Psi >$.

Для нахождения благоприятных начальных фаз из диапазона $-\pi < \Psi_0 < \pi$, при которых происходит захват заряда в режим неограниченного ускорения волной, фиксировалась фазовая скорость волны $\beta_p \approx \beta_p$. Амплитуда волны σ выбиралась выше порогового значения σ_c : $\sigma = 1.5 \sigma_c$. Затем численными расчетами на относительно малых временах $\tau < 20000$ определялся диапазон начальных фаз, в котором имел место захват заряда в режим неограниченного ускорения волной.

Приведем результаты расчетов для следующего варианта параметров задачи $h = 5.1$, $g = 1$, $\beta_p = 0.9$, $u = 0.2$, $\sigma = 1.5 \sigma_c$, $\sigma_c = u \gamma_p$, $a = 0$, когда $\gamma_0 = 12.186$. Согласно расчетам для большей части начальных фаз $\Psi(0)$ из интервала $-\pi < \Psi(0) < \pi$ захват частиц волной происходит сразу либо на относительно малых временах τ по сравнению со временем ультрарелятивистского ускорения $\tau_{he} \sim 10^5 \div 10^6$, которое соответствует росту энергии заряда на три-четыре порядка величины.

Для случая $\Psi(0) = 2$ графики фазы $\Psi(\tau)$, смещения частицы в направлении распространения волны $\xi(\tau)$ показаны на рис. 1 на интервале времени $\tau < 8 \cdot 10^4$. После захвата частицы в эффективную потенциальную яму фаза $\Psi(\tau)$ колеблется около значения, соответствующего дну этой ямы. Согласно рис. 2, смещение захваченного заряда вдоль направления распространения волны возрастает в среднем пропорционально времени $\xi(\tau) \approx \beta_p \tau$. Динамика релятивистского фактора заряда $\gamma(\tau)$ для интервала времени $\tau < 8 \cdot 10^4$ представлена на рис. 3. Как видим, $\gamma(\tau)$ монотонно возрастает согласно указанной на рис. 3 асимптотике $M(\tau)$. В конце интервала имеем $\gamma(\tau) \approx 3.3 \cdot 10^4$ при $\gamma(0) \approx 12.19$.

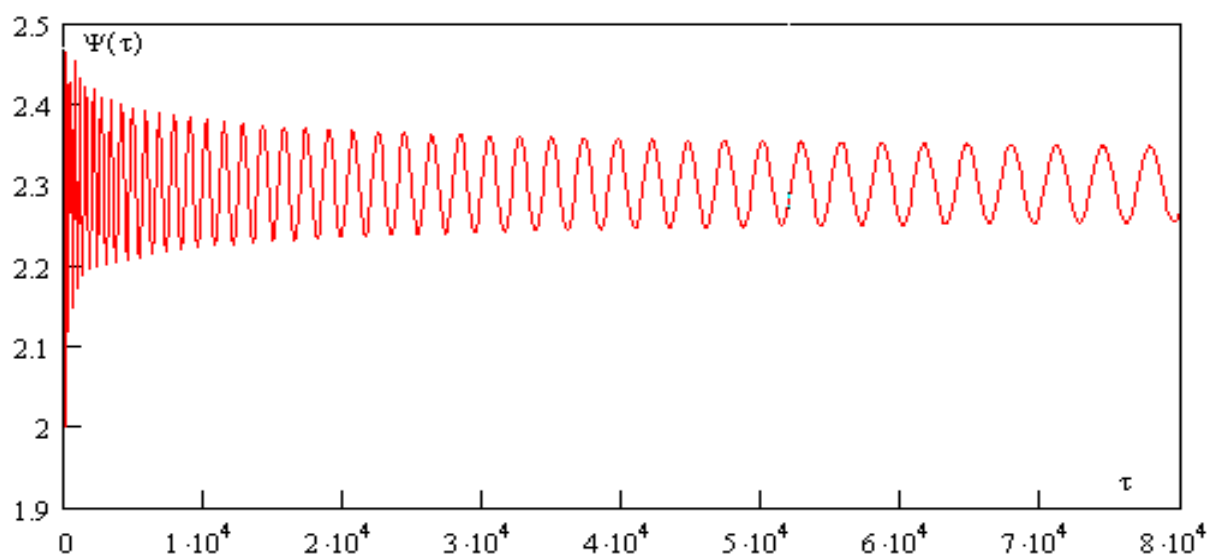


Рис. 1. График фазы волны на траектории заряда

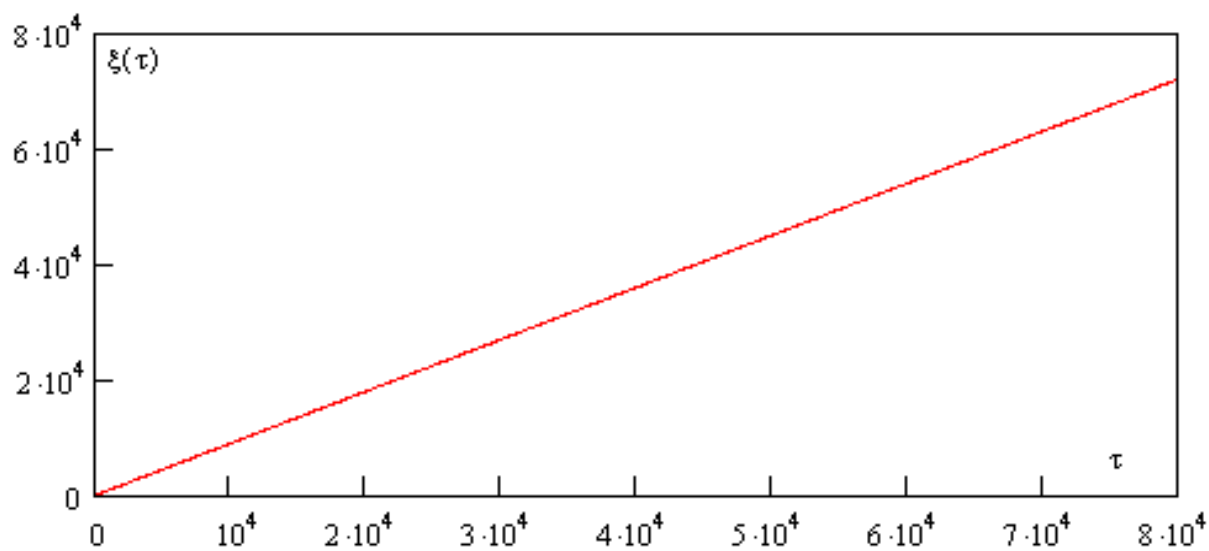


Рис. 2. Смещение заряда в направлении распространения волны

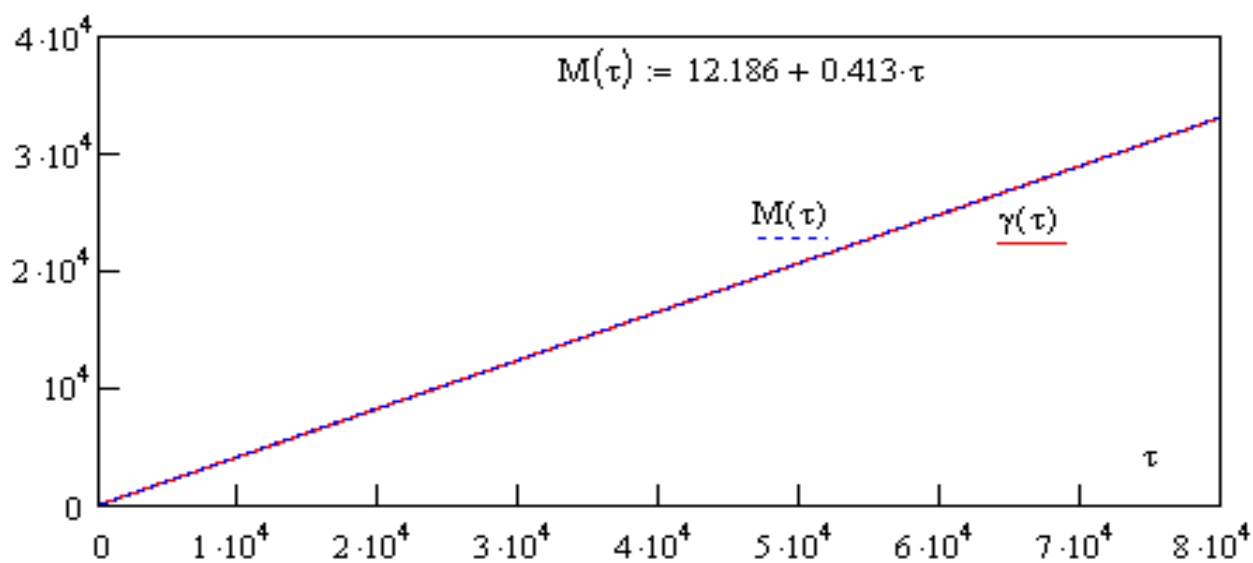


Рис. 3. Динамика релятивистского фактора ускоряемого электрона

На большей части интервала электрон является ультррелятивистской частицей поскольку выполняются следующие асимптотики $\gamma(\tau) \approx u \beta_p \gamma_p \tau$, $\beta_x \approx \beta_p$, $\beta_y \approx 1 / \gamma_p$, $\beta_z \rightarrow 0$. Графики поперечных компонент импульса электрона $g_x = (\tau) \beta_x(\tau)$, $g_y = \gamma(\tau) \beta_y \tau$ представлены на рис.4. Рост g_x , g_y происходит практически с постоянным темпом. Пусть $\Phi(\tau) = d\Psi / d\tau$. Структура фазовой плоскости (Φ , Ψ) показана на рис. 5. Траектория изображающей точки соответствует колебаниям захваченного электрона с уменьшающейся амплитудой около дна эффективной потенциальной ямы, которое является особой точкой типа устойчивый фокус. Траектория ускоряемого электрона на плоскости (x, y) , перпендикулярной внешнему магнитному полю, дана на рис. 6 для интервала времени $\tau < 8 \cdot 10^4$. Практически это прямая линия.

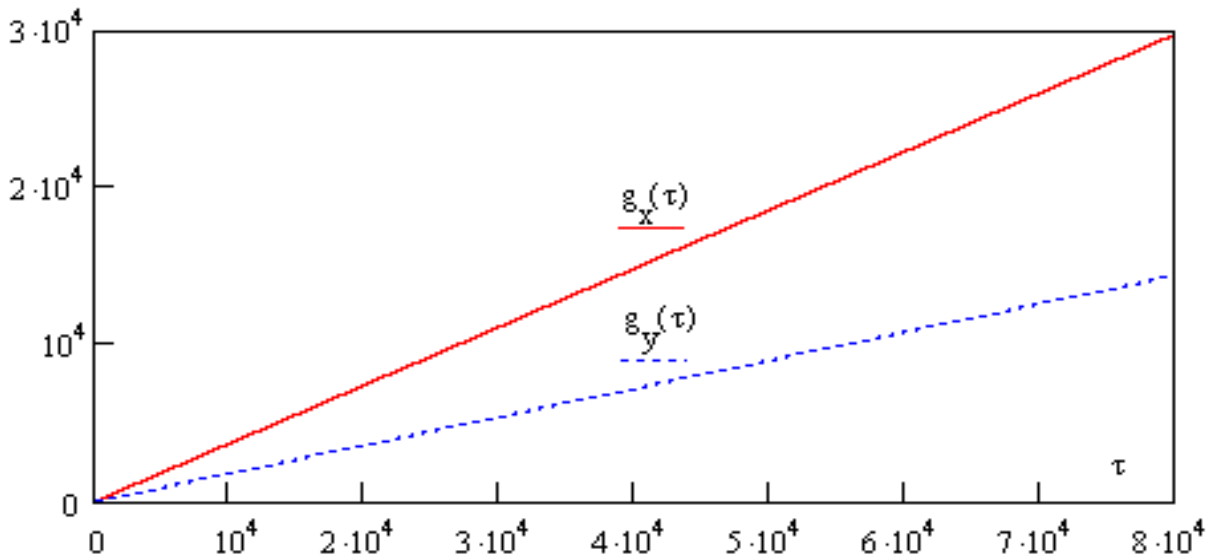


Рис. 4. Графики поперечных компонент импульса электрона

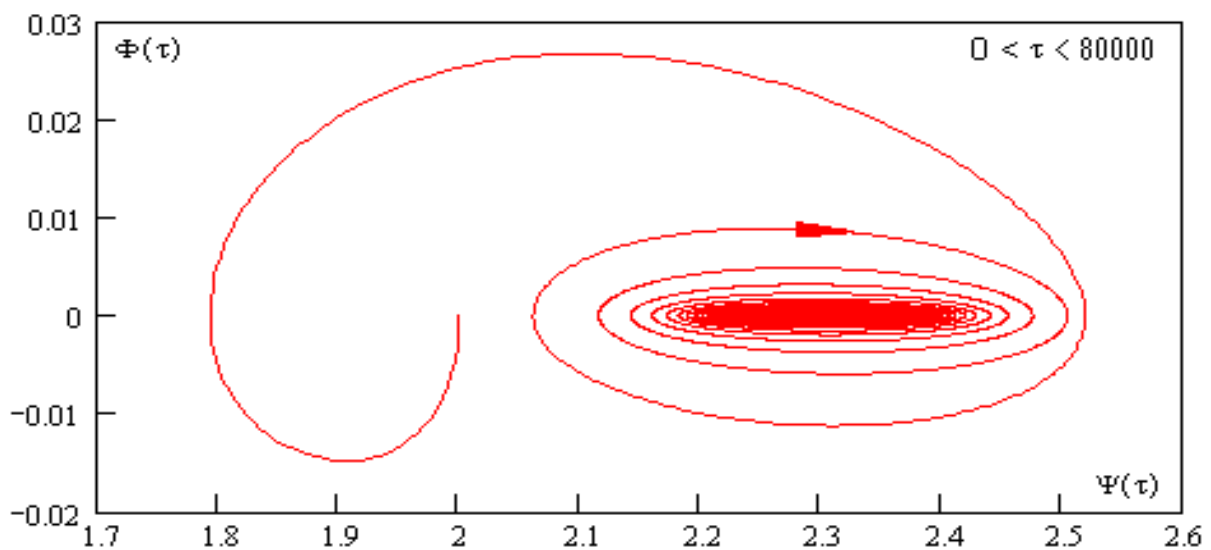


Рис. 5. Структура фазовой плоскости ускоряемого электрона

Для случая $\Psi(0) = 2$ были проведены расчеты для значений безразмерного продольного импульса электрона $h = 20, 40, 100$. Результаты вполне аналогичны описанным выше. Обнаружено также, что начальная фаза $\Psi(0)$, благоприятная для захвата электрона в режим неограниченного ускорения волной при $h = 5.1$, является таковой и для больших значений продольного импульса h . В качестве иллюстрации данного утверждения на рис. 7 показана динамика фазы волны на траектории электрона для случая $h = 100$, вполне аналогичная приведенной на рис. 2. График релятивистского фактора электрона для случая $h = 100$, приведенный на рис. 7, вполне подобен показанному на рис. 3.

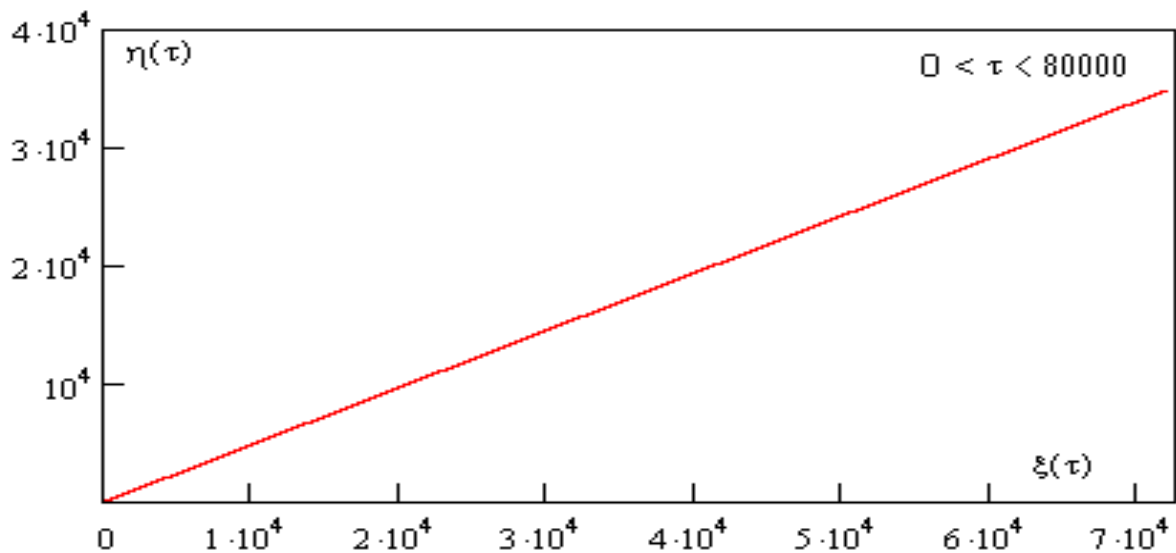


Рис. 6. Траектория электрона на плоскости (x, y)

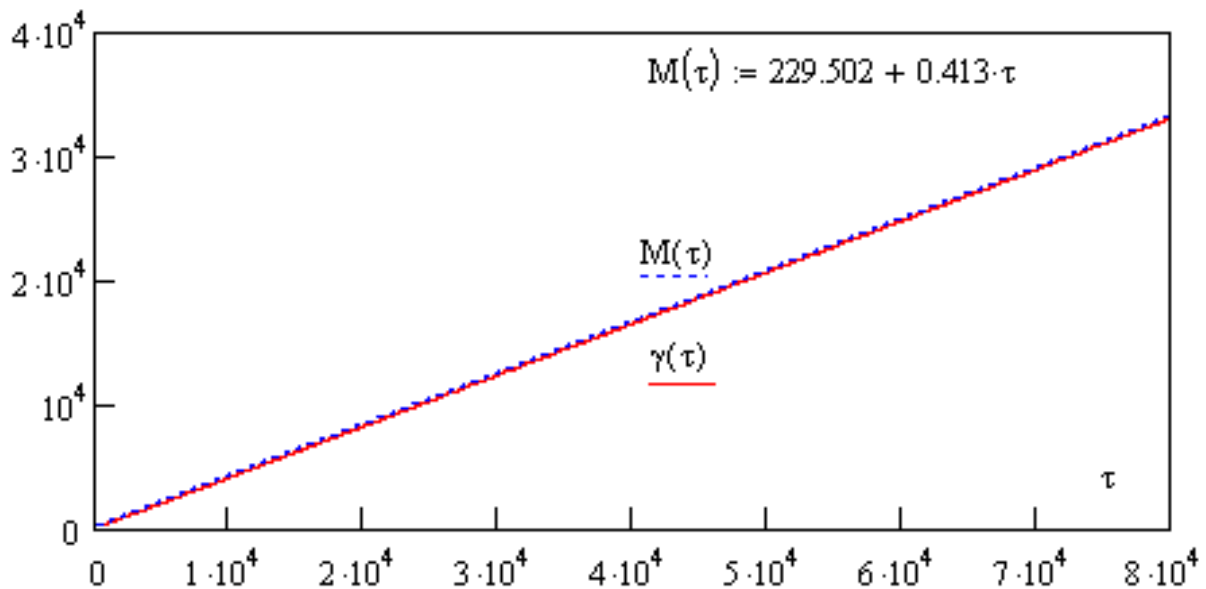


Рис. 7. Динамика релятивистского фактора электрона для случая $h = 100$

Расчеты для других вариантов выбора начальной фазы $\Psi(0)$ приводят к выводу о том, что увеличение продольного импульса электрона не меняет время захвата частицы волной в режим ультрарелятивистского ускорения. Это означает, что число частиц, испытывающих сильное серфотронное ускорение электромагнитной волной в плазме, может быть достаточно большим. Генерация потоков ультрарелятивистских заряженных частиц в космической плазме характеризуется большой (в масштабе периода волны) длительностью взаимодействия и соответственно получаются весьма высокие энергии ускоренных частиц. Так в солнечной гелиосфере характерные энергии при серфотронном ускорении зарядов достигают десятков сотен ГэВ [11] при начальной кинетической энергии порядка или меньше Гэв.

Интересный случай динамики черенковского взаимодействия частицы с волной возникает при выборе отрицательных начальных значений для компоненты импульса электрона вдоль волнового фронта. Согласно расчетам вначале у захваченной частицы происходит перестройка импульса $\gamma \beta_y$ на положительные значения, сопровождающаяся уменьшением энергии частицы. При этом темп торможения заряда практически постоянен. Затем после изменения знака импульса $\gamma \beta_y$ имеет место серфотронное ускорение частицы до больших энергий.

Заключение

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

- Во-первых, на основе численных расчетов нелинейного, нестационарного уравнения для фазы волны на траектории частицы изучена зависимость ультрарелятивистского серфотронного ускорения электронов электромагнитной волной, распространяющейся в космической плазме поперек внешнего магнитного поля, от величины продольного (к внешнему магнитному полю) импульса частицы $h = \gamma \beta_z$.
- Показано, что при выполнении условия черенковского резонанса захват частиц в режим серфинга происходит для широкого диапазона значений начальной фазы волны на траектории электронов $\Psi(0)$. Величина благоприятной (для захвата электрона) начальной фазы $\Psi(0)$ не меняется при увеличении продольного импульса частицы $\gamma \beta_z$ на один-два порядка величины.
- Число ускоренных волной частиц может быть достаточно большим вследствие резкого увеличения в пространстве начальных импульсов области, из которой заряды попадают в режим сильного серфотронного ускорения.
- Расчеты показали, что при ускорении компоненты импульса и релятивистский фактор частицы возрастают с постоянными темпами, компоненты поперечной скорости выходят на асимптотические значения, продольная скорость убывает обратно пропорционально нарастающему релятивистскому фактору электрона.
- Проведенный численный анализ серфинга электронов на электромагнитных волнах представляет интерес для физики космической плазмы [10-12], в частности, для интерпретации экспериментальных данных по регистрации потоков релятивистских частиц в околоземном пространстве и гелиосфере, в частности, объяснения причин возможных отклонений наблюдаемых спектров быстрых частиц от стандартных степенных скейлингов. Для параметров гелиосферы характерные энергии ускоренных частиц могут достигать величин порядка десятков - сотен ГэВ.
- Таким образом серфинг заряженных частиц на электромагнитных волнах является одним из возможных механизмов генерации космических лучей.

Литература:

1. K a t s o u l e a s, N., J. M. D a w s o n. Unlimited electron acceleration in laser-driven plasma wave. Physical Review Letters, 1983, v. 51, № 5, pp. 392-395.
2. J o s h i, C. The surfatron laser-plasma accelerators. Prospects and limitations. Radiation in plasmas, 1984, v.1, № 4, pp. 514-527.
3. Г р и б о в, Б. Э., Р. З. С а г д е е в, В. Д. Ш а п и р о, В. И. Ш е в ч е н к о. О затухании плазменных волн и ускорении резонансных электронов в поперечном магнитном поле. Письма в ЖЭТФ, 1985, т.42, вып.2, с. 54-58.
4. Б у л а н о в, С. В., А. С. С а х а р о в. Ускорение частиц, захваченных сильной потенциальной волной с искривленным фронтом в магнитном поле. Письма в ЖЭТФ, 1986, т. 44, вып. 9, с. 421-423.
5. С и т н о в, М. И. Максимальная энергия частиц в серфатроне в режиме "неограниченного ускорения". Письма в ЖТФ, 1988, т. 14, вып. 1, с. 89-92.
6. Е р о х и н, Н. С., А. А. Л а з а р е в, С. С. М о и с е е в, Р. З. С а г д е е в. Увлечение и ускорение заряженных частиц замедленной волной в неоднородной плазме. ДАН СССР, 1987, т. 295, № 4, с. 849-852.
7. Е р о х и н, Н. С., С. С. М о и с е е в, Р. З. С а г д е е в. Релятивистский серфинг в неоднородной плазме и генерация космических лучей. - Письма в Астрономический журнал, 1989, т.15, № 1, с.3-10.
8. Е р о х и н, Н. С., Н. Н. З о л ь н и к о в а, А. Г. Х а ч а т ь я н. Ускорение зарядов поперек магнитного поля при взаимодействии сильной плазменной волны с многокомпонентными потоками релятивистских частиц. - Физика плазмы, 1990, т. 16, вып. 8, с. 945-947.
9. К и ч и г и н, Г. Н. Особенности ускорения электронов в серфатроне. – ЖЭТФ, 1995, т.108, вып.10, с. 1342-1354.
10. S h k e v o v R., N. S. E r o k h i n, L.A. M i k h a i l o v s k a y a, N. N. Z o l n i k o v a. Numerical investigation of the efficiency of charged particles surfatron acceleration by wave packets in space plasma, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.07.001>. JASTP V.99, pp. 73-77, 2013.
11. Л о з н и к о в, В. М., Н. С. Е р о х и н. Переменный источник избытка космических электронов в гелиосфере. Вопросы атомной науки и техники, сер. Плазменная электроника, № 4 (68), с. 121-124, 2010.
12. Е р о х и н, Н. С., Н. Н. З о л ь н и к о в а, Е. А. К у з н е ц о в, Л. А. М и х а й л о в с к а я. Динамика релятивистского ускорения заряженных частиц в космической плазме при серфинге на пакете электромагнитных волн. Вопросы атомной науки и техники, сер. Плазменная электроника, № 4(68), с. 116-120, 2010.