

Влияние процесса многократного рассеяния релятивистского электронного пучка в газоплазменной среде на динамику резистивной шланговой неустойчивости

© Е.К. Колесников, А.С. Мануйлов, В.С. Петров

Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: a.manuylov@spbu.ru, man06@mail.ru

(Поступило в Редакцию 29 ноября 2017 г.)

Рассмотрено влияние процесса многократного кулоновского рассеяния на пространственную динамику резистивной шланговой неустойчивости релятивистского электронного пучка, распространяющегося вдоль омического плазменного канала. Показано, что усиление процесса рассеяния заметно ослабляет указанную неустойчивость.

DOI: 10.21883/JTF.2018.07.46187.2577

Введение

В последнее время внимание исследователей привлекают вопросы распространения релятивистских электронных пучков (РЭП) в плотных и разреженных газоплазменных средах [1–9]. Особое внимание уделяется проблеме поперечного расширения пучка во время транспортировки за счет процесса многократного кулоновского рассеяния электронов пучка на атомах и молекулах фоновой газоплазменной среды [4,5]. Кроме того, достаточно активно исследуется проблема возбуждения и динамики различных крупномасштабных резистивных неустойчивостей, таких как резистивная шланговая неустойчивость (РШН), резистивная перетяжная неустойчивость (РПН) и т.д. [2,3,7–9].

В настоящей работе исследуется влияние процесса многократного рассеяния электронов РЭП на атомах и молекулах фоновой газоплазменной среды на пространственную динамику РШН.

Постановка и решение задачи

Рассмотрим азимутально-симметричный моноскоростной параксиальный РЭП, распространяющийся вдоль оси z цилиндрической системы координат r, θ, z вдоль предварительно созданного омического плазменного канала с проводимостью $\sigma(r)$. В хорошем соответствии с экспериментом и теорией эволюция характерного радиуса квазистационарного РЭП R_b в результате многократного рассеяния электронов пучка на частицах фоновой среды описывается законом Нордсика [3,4]

$$R_b^2(z) = R_{b0}^2 G(z), \quad G(z) = \exp\left(\frac{2z}{L_N}\right), \quad (1)$$

где R_{b0} — начальный радиус пучка, z — расстояние, пройденное поперечным тонким сегментом пучка от ускорителя, L_N — характерная длина расширения пучка за счет рассеяния (длина Нордсика).

Предположим, что все параметры задачи не зависят от $\xi = v_z t - z$, где v_z — продольная компонента скорости электронов пучка, t — время, ξ — расстояние от переднего фронта пучка до рассматриваемого поперечного сечения РЭП.

Кроме того, для простоты здесь будем считать, что фазовое перемешивание траекторий электронов пучка в ангармоничной потенциальной яме коллективного электромагнитного поля системы плазма–пучок отсутствует.

Сформулируем систему уравнений динамики РШН РЭП на линейной стадии развития неустойчивости в рамках модели „жесткого“ пучка [5]

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} = k_S^2 (D - Y), \quad (2)$$

$$D + \xi_d \frac{\partial D}{\partial \xi} = Y, \quad (3)$$

где Y и D — соответственно амплитуды отклонения оси симметрии РЭП и оси коллективного электромагнитного поля системы плазма–пучок от оси симметрии плазменного канала,

$$k_S(z) = \sqrt{\frac{(1 - f_m) I_b}{I_A} \frac{1}{R_b(z)}}, \quad \xi_d(z) = \frac{\pi R_b^2(z) \sigma(0)}{c} \quad (4)$$

— соответственно волновое число шланговых колебаний и дипольная скин-длина. Здесь f_m — коэффициент токовой нейтрализации, I_b — полный ток пучка, I_A — предельный ток Альфвена, $\sigma(0)$ — омическая проводимость плазменного канала при $r = 0$, c — скорость света.

Начальные и краевые условия зададим в следующем виде:

$$D|_{\xi=0} = 0, \quad Y|_{z=0} = 0.05 R_{b0}, \quad \frac{\partial Y}{\partial z}|_{z=0} = 0. \quad (5)$$

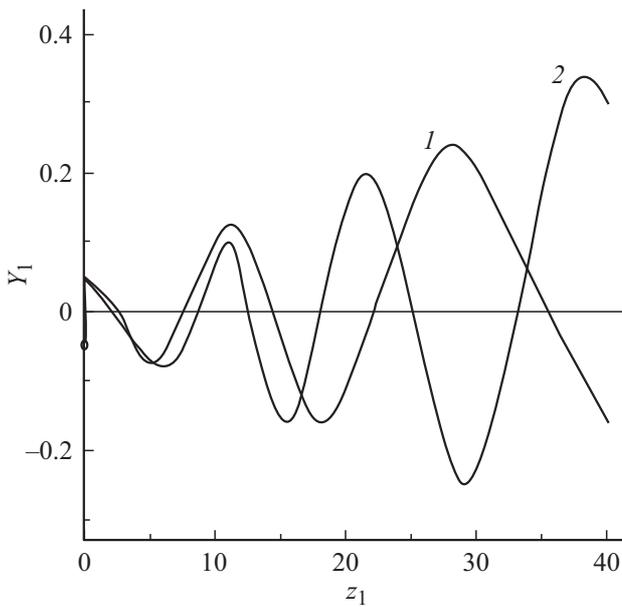


Рис. 1.

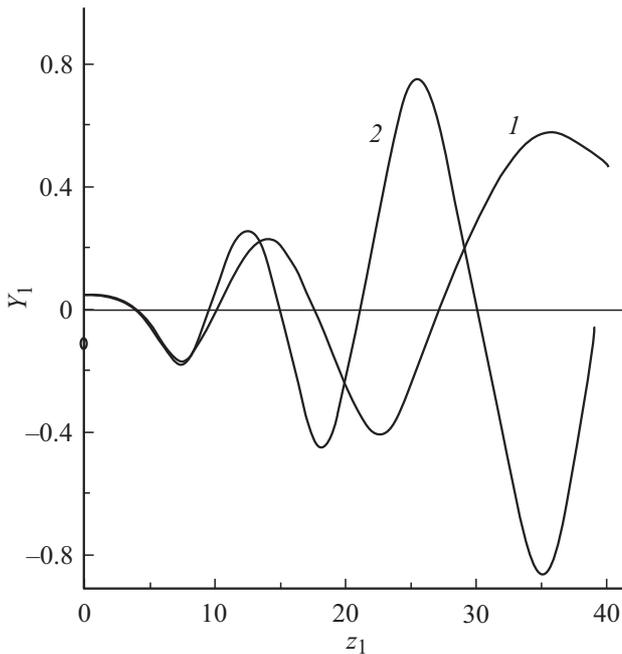


Рис. 2.

Рассмотрим следующие безразмерные величины:

$$Y_1 = \frac{Y}{R_{b0}}, D_1 = \frac{D}{R_{b0}}, z_1 = zk_{s0}, \xi_1 = \frac{\xi}{\xi_{d0}}, \quad (6)$$

где

$$k_{s0} = \sqrt{\frac{(1 - f_m)I_b}{I_A} \frac{1}{R_{b0}}}, \xi_{d0} = \frac{\pi R_{b0}^2 \sigma(0)}{c}. \quad (7)$$

Тогда система уравнений (2), (3) принимает вид

$$\frac{\partial^2 Y_1}{\partial z_1^2} = \frac{1}{G_1(z_1)} (D_1 - Y_1), \quad (8)$$

$$D_1 + G_1(z_1) \frac{\partial D_1}{\partial \xi_1} = Y_1. \quad (9)$$

Здесь

$$G_1(z_1) = \exp\left(\frac{2z_1}{L_{N1}}\right), \quad (10)$$

где $L_{N1} = L_N k_{s0}$. Начальные и краевые условия принимают вид

$$D_1|_{\xi_1=0} = 0, Y_1|_{z_1=0} = 0.05, \frac{\partial Y_1}{\partial z_1}|_{z_1=0} = 0. \quad (11)$$

На рис. 1,2 представлены полученные в результате численного решения системы (8)–(11) зависимости Y_1 от z_1 при разных значениях ξ_1 и L_{N1} . Рис. 1 соответствует случаю $\xi_1 = 2$, рис. 2 — $\xi_1 = 4$. Кривые 1 относятся к случаю $L_{N1} = 20$, а кривые 2 — к ситуации $L_{N1} = 30$.

Из полученных графиков следует, что усиление процесса многократного рассеяния, соответствует уменьшению характерной длины Нордсика L_{N1} , что заметно понижает пространственный рост РШН релятивистского электронного пучка.

Заключение

В настоящей работе исследовано влияние процесса многократного кулоновского рассеяния релятивистского электронного пучка на атомах и молекулах фоновой газоплазменной среды на пространственную динамику резистивной шланговой неустойчивости пучка. С помощью численного решения уравнений динамики указанной неустойчивости показано, что усиление процесса рассеяния (при этом длина Нордсика становится меньше) на рассматриваемых дистанциях распространения пучка $z_1 = zk_{s0} = 40$ (k_{s0} — волновое число шланговых колебаний, z — размерная дистанция, пройденная пучком) понижает амплитуду поперечных колебаний пучка в 1.4–1.6 раза.

Список литературы

- [1] Рухадзе А.А., Богданкевич Л.С., Росинский С.Е., Рухлин В.Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1980. 167 с.
- [2] Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984. 432 с.
- [3] Колесников Е.К., Мануйлов А.С., Филиппов Б.В. Динамика пучков заряженных частиц в газоплазменных средах. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. 98 с.
- [4] Lee E.P., Cooper R.K. // Part. Accelerators. 1976. Vol. 7. P. 83–95.
- [5] Lee E.P. // Phys. Fluids. 1978. Vol. 21. N 8. P. 1327–1343.

- [6] *Надеждин Е.Р., Сорокин Г.А.* // ФП. 1983. Т. 9, № 5. С. 989–991.
- [7] *Кондратьев Н.А., Сметанин В.И.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 3. С. 67–73.
- [8] *Мануйлов А.С.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 1. С. 76–78.
- [9] *Колесников Е.К., Мануйлов А.С.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 12. С. 43–46.