

УДК 53.097, 53.098

## **Траектория заряженной частицы в экспоненциально убывающем электромагнитном поле**

*Маслов А.Г., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Физика»*

*Научный руководитель: Герасимов Ю.В., к.ф.-м.н., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[fn@bmstu.ru](mailto:fn@bmstu.ru)*

### **Введение**

Для решения задачи об определении рационального состава и параметров плазменного образования для оптимального воздействия на некоторую поверхность необходимо определить траекторию частицы в изменяющемся электромагнитном поле. Подобная техническая задача возникает в следующих случаях: разгон наноспутника или снаряда в канале рельсотрона, прочностные испытания объектов, подверженных воздействию потоков плазмы. Соответственно, задачу можно поставить следующим образом:

В замкнутом объёме  $V$ , контур которого представлен на рисунке 1, находится плазменное образование из многокомпонентной химической плазмы. По контуру объёма протекает ток силой  $I$ . Который переходит в плазму в наиболее горячей её части, расположенной вдоль поверхности воздействия (см. рис. 1). В результате взаимодействия носителей тока в горячей части плазменного образования с электромагнитным полем, формируемым протекающим током, носители тока движутся по некоторой траектории близкой к циклоиде в направлении поверхности воздействия. Необходимо оценить траекторию движения различного рода частиц химической плазмы в зависимости от характеристик электромагнитного поля, удельных зарядов носителей тока в химической плазме и ряда других характеристик. Исследованию траекторий частиц посвящено множество работ, например [1], [2], [3], [4], однако нами используется другой частный случай движения частиц.

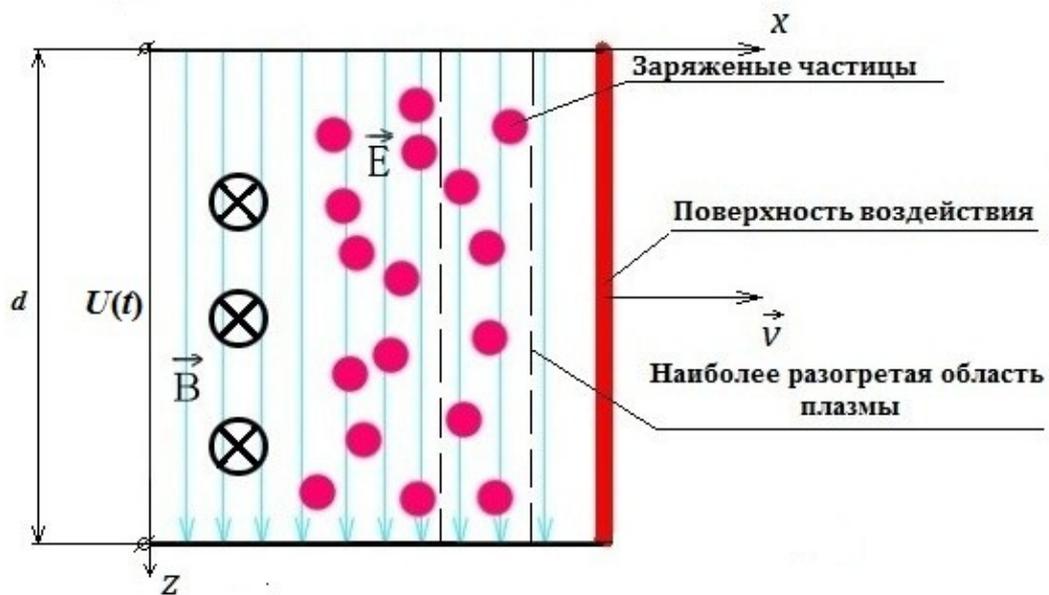


Рис. 1. Принципиальная схема полей и движения частиц

### Расчёт траектории частицы в экспоненциально убывающем электромагнитном поле

Стоит задача оценки траектории движения, поэтому рассматривается случай полёта одной заряженной частицы, использованы приближения однородного электрического и магнитного полей, соответственно, результаты справедливы только в случае, если радиус кривизны траектории частицы меньше длины электромагнитной волны, излучаемой электромагнитным полем. Для движения частицы под действием обобщённой силы Лоренца составлена система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = qE \\ m\ddot{y} = qBv \end{cases} \quad (1)$$

где  $m$  – масса частицы,  $q$  – заряд частицы,  $E$  и  $B$ , соответственно напряжённость электрического и индукция магнитного поля.

Если известно напряжение  $U(t)$ , то можно задать электрическое и магнитное поля[5]:

$$\begin{aligned} E &= \frac{U}{d} \\ B &= \frac{\mu_0 I}{d} = \frac{\mu_0 U}{dR} = k_m E, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R$  – сопротивление цепи,  $k_m = \frac{\mu_0}{R}$  – коэффициент пропорциональности.



Для следующих значений параметров:  $U_0=5$  КВ,  $C=800$  мкФ,  $R=0,1$  Ом,  $d=3$  мм,  $q=1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m=1.6 \cdot 10^{-27}$  кг,  $k_m=4\pi 10^{-6} \frac{C}{M}$ ,  $n=10^{29} \frac{1}{M^3}$ ,  $S=10^{-6} m^2$ , была построена траектория частицы за 3 наносекунды полёта, представленная на рисунке 2.

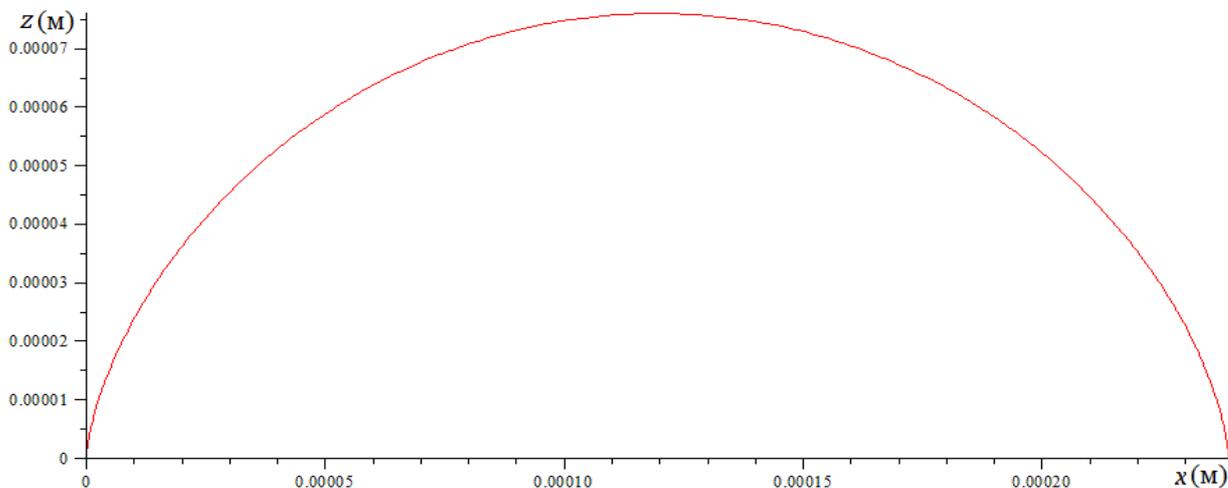


Рис. 2. Траектория частицы в экспоненциально убывающем электромагнитном поле за 3 нс полёта

Траектория на рис. 2 очень близка к классической циклоиде и для нахождения отличий был рассмотрен случай неограниченного пространства с теми же напряжённостью электрического поля и магнитной индукцией. В этом абстрактном случае, траектория частицы за время от 0 до 3 миллисекунд имеет вид, представленный на рисунке 3:

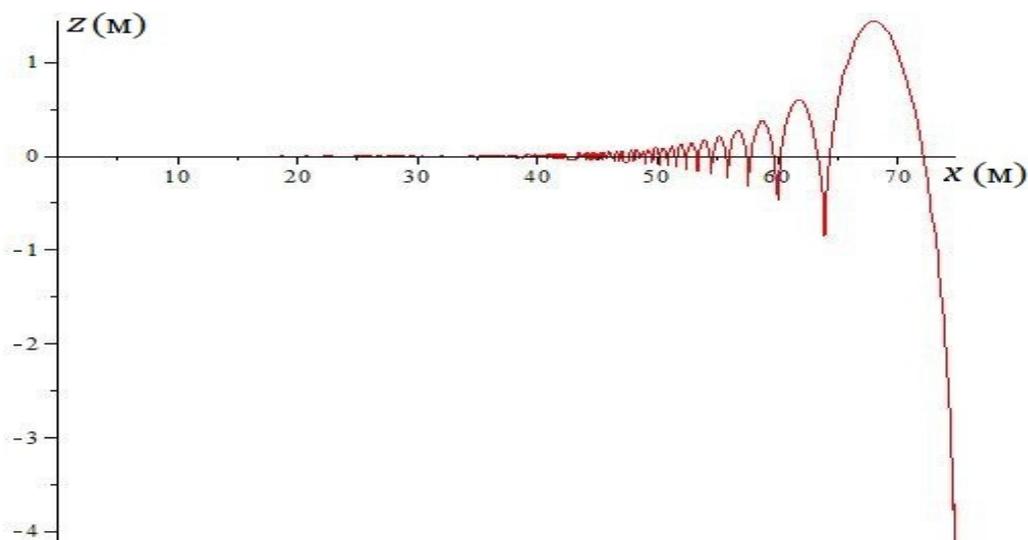


Рис. 3. Траектория частицы в экспоненциально убывающем поле, на временах больше времени релаксации (3мс)

### **Выводы:**

1. Решена задача о движении заряженной частицы в экспоненциально убывающем электромагнитном поле, позволяющая рационализировать основные параметры плазменного образования, электромагнитного поля и композиции частиц плазменного образования.
2. Существенно изменяющаяся траектория частицы в изменяющемся электромагнитном поле приводит к необходимости детально рассмотреть задачу о рационализации параметров разгона рабочей поверхности на различных этапах.

### **Список литературы**

1. Байсанов О. А., Доскеев Г. А., Зарипова З. Г., Спивак-Лавров И. Ф. Дифференциальные уравнения, определяющие отклонение частиц ионного пучка от осевой траектории в электрических и магнитных полях // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 109-115.
2. Байсанов О. А., Доскеев Г. А., Еденова О. А., Спивак-Лавров И. Ф. Исследование влияния краевых полей на движение заряженных частиц в плоском и цилиндрическом конденсаторах // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 67-72.
3. Истомин Я.Н., Собьянин Д.Н. Возникновение магнитосферы радиопульсаров из вакуума с сильным магнитным полем. Движение заряженных частиц // Астрономический журнал. 2010. Т. 87. № 4. С. 379-396.
4. Удовиченко С.Ю. Динамика компенсированных пучков заряженных частиц во внешнем магнитном и собственных полях // Журнал технической физики. 1998. Т. 68. № 8. С. 106-109.
5. Landen D. and Satapathy S. Eddy Current Effects in the Laminated Containment Structure of Railguns // IEEE Transactions on Magnetics. 2007. No. 1. Vol. 43. P. 150-156. DOI: 10.1109/TMAG.2006.887449.