

УДК 629.78+539.1

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КАТУШЕЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ РАЗГОНА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ

© 2013 К. И. Сухачёв, Н. Д. Сёмкин

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Проведён анализ катушечных электромагнитных ускорителей и определены физические ограничения на максимальное ускорение, сообщаемое ферромагнитному телу. Проведено математическое моделирование работы одной ступени катушечного электромагнитного ускорителя, включая пространственное моделирование траектории частицы. Исследовано влияние параметров тяговых катушек, начальных условий и материала частиц на конечную скорость.

Электромагнитный катушечный ускоритель, резонансный ускоритель, ферромагнетики, моделирование магнитного поля и ускоряющей силы.

Введение

Проблема изучения высокоскоростного воздействия частиц на материалы космических аппаратов возникла более пятидесяти лет назад. Однако вследствие появления новых материалов [1] и всё увеличивающейся концентрации техногенных высокоскоростных частиц на орбитах Земли проблема продолжает оставаться актуальной и на сегодняшний день. Как показала практика, наиболее целесообразным является лабораторное моделирование столкновения ускоренных частиц с различными материалами, так как при этом возможны не только высокая повторяемость и контролируемость эксперимента, но и измерение параметров частиц с достаточной достоверностью. Так как на космические аппараты воздействуют частицы в широком диапазоне масс, то моделировать их с помощью одного устройства затруднительно. Воздействие частиц микронного диапазона моделируется с помощью электростатических и электродинамических ускорителей [2,3]. Для имитации более крупных частиц (до нескольких миллиметров), как правило, применяют легкогазовые системы метания и реже – рельсовые электромагнитные ускорители. Данные способы метания тел позволяют получить высокие скорости

(до 10 км/с), но при этом их затруднительно использовать для моделирования космических условий высокоскоростного удара. Наиболее подходящим для этих целей является катушечный электромагнитный ускоритель, использующий энергию магнитного поля тяговых соленоидов для ускорения ферромагнитных тел. В статье описаны процессы, протекающие в катушечных ускорителях, построена модель движения частицы, проведён анализ конструкции таких систем и сделан вывод о возможности использования катушечных ускорителей в экспериментальной физике.

Моделирование магнитного поля

Любой катушечный ускоритель в простейшем случае состоит из источника электрической энергии (ёмкостного или индуктивного накопителя) и тягового соленоида. По соленоиду протекает ток, создавая в пространстве внутри и вокруг себя неоднородное магнитное поле, которое, взаимодействуя с магнитными доменами вещества частицы, вызывает его ускорение. Для того, чтобы оценить силу, действующую на частицу, необходимо смоделировать магнитное поле соленоидов с током, причём для полноты исследований

необходимо рассмотреть разные конструкции катушек. Тяговые катушки независимо от конструкции состоят из кольцевых витков, так как круг обладает минимальной площадью и, следовательно, плотность линий магнитной индукции в нём будет выше.

Рассмотрим один виток катушки, представляющий собой круговой виток радиусом R , по которому протекает ток. Для построения адекватной модели движения необходимо построить модель поля, позволяющую находить вектор магнитной индукции в любой точке пространства. Модуль магнитной индукции элемента проводника с током $I(t)$ можно найти по формуле [4]:

$$|dB| = \frac{m_0}{4p} I(t) \cdot \frac{dl \cdot \sin a}{r^2}, \quad (1)$$

где dl – элемент проводника с током; r – вектор, соединяющий точку, в которой необходимо найти величину магнитного поля, и элемент проводника dl ; a – угол между элементом dl и вектором r ; m_0 – магнитная постоянная.

Пусть ток $I(t)$ течёт по круговому проводнику радиусом R . Тогда можно сделать замену: $dl = Rdf$, которая справедлива при малых углах df . Следует заметить, что магнитное поле кругового витка с током обладает симметрией относительно оси OZ . Поэтому достаточно

$$\begin{cases} B_x = \frac{m_0}{4p} I(t) R \int_0^{2p} \frac{\sin^2 f}{R^2 + X^2 - R(2X \cos f + R \sin^2 f)} df, \\ B_y = \frac{I(t) m_0}{2}, \\ B_z = \frac{m_0 R}{2Z^2} I(t). \end{cases} \quad (4)$$

Тогда индукция, создаваемая кольцом на плоскости XOZ , в точке с координатами X, Z равна: $|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$. Для

найти поле в одной из полуплоскостей YOZ или XOZ . При выборе последней X, Z являются координатами расчётной точки.

Магнитная индукция, создаваемая участком dl , является векторной величиной. Поэтому расчёт по формуле (1) следует производить через компоненты:

$$\begin{cases} |dB_x| = \frac{m_0}{4p} R I(t) \frac{\sin a_x}{r_x^2} df, \\ |dB_y| = \frac{m_0}{4p} R I(t) \frac{\sin a_y}{r_y^2} df, \\ |dB_z| = \frac{m_0}{4p} R I(t) \frac{\sin a_z}{r_z^2} df. \end{cases} \quad (2)$$

Найдём проекции вектора r и синуса угла a :

$$\begin{cases} r_x = \sqrt{R^2 + X^2 - R(2X \cos f + R \sin^2 f)}, \\ r_y = R \sin f, \\ r_z = Z, \\ \sin a_x = \cos f, \\ \sin a_y = \sin f, \\ \sin a_z = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Подставим (3) в (2) и проинтегрируем по всему кольцу:

перехода от единичного кольца с током к катушке необходимо просуммировать компоненты вектора магнитного поля, создаваемого всеми витками катушки. Тогда

модуль вектора магнитной индукции, создаваемый катушкой, состоящей из n слоёв по m витков в каждом, в точке с координатами X и Z будет равен:

$$|B| = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sqrt{(B_{0z})_{ij}^2 + (B_{0x})_{ij}^2}. \text{ Необходимо}$$

учесть, что для каждого витка координата расчётной точки Z будет сдвинута на величину, равную шагу витков катушки.

Симметрия магнитного поля катушки позволяет провести вращение полученного среза поля, лежащего на плоскости $X_G, 0, Z_G$, и рассчитывать магнитную индукцию в любой точке с координатами X_G, Y_G, Z_G , проведя следующее преобразование: $Z = Z_G, X = \sqrt{X_G^2 + Y_G^2}$, что позволяет получить трёхмерную картину поля.

Для расчёта величины магнитного поля необходимо определить значение тока, протекающего в рассматриваемый момент времени по катушке. Для данной модели примем, что источником энергии является конденсаторная батарея ёмкостью C , заряженная до напряжения $U_C(0)$; L_{sum} – общая индуктивность контура, в которую основной вклад вносит индуктивность самой тяговой катушки; R_{sum} – суммарное сопротивление контура. Тогда ток можно найти по формуле [5]:

$$I(t) = \frac{U_C(0)}{L_{sum}(d_1 - d_2)} (e^{d_1 t} - e^{d_2 t}), \quad (5)$$

$$\text{где } d_{1,2} = -\frac{R_{sum}}{2L_{sum}} \pm \sqrt{\frac{CR_{sum}^2 - 4}{4CL_{sum}}}.$$

Уравнение движения

Следующим шагом в построении модели движения является определение силы, действующей со стороны неоднородного магнитного поля на ферромагнитное тело [6]. Известно, что компоненты силы, действующие на любой магнитный диполь, равны:

$$\begin{cases} F_x = m \operatorname{grad} B_x, \\ F_y = m \operatorname{grad} B_y, \\ F_z = m \operatorname{grad} B_z, \end{cases} \quad (6)$$

где m – магнитный дипольный момент.

Рассмотрим кубический элемент ферромагнитной частицы, помещённой в магнитное поле. Материал элемента перейдёт в состояние равномерной намагниченности при величине внешнего поля, большей его индукции насыщения. Это означает, что все атомные магнитные дипольные моменты имеют примерно одинаковое направление. Это условие достижимо только в равномерном внешнем магнитном поле, по линиям магнитной индукции которого выстраиваются атомные магнитные моменты. Из этого следует, что размеры кубического элемента должны быть настолько малы, что внешнее поле в его области можно было считать равномерным. В таких условиях элемент намагниченного вещества можно считать магнитным диполем с собственным магнитным дипольным моментом M , равным произведению эффективных атомных моментов $(m_j)_{MAX}$ на количество атомов N [7]. Количество атомов в элементе объёма частицы равно:

$$N = \frac{N_A r_{mat} \Delta a^3}{M_{mat}}, \quad (7)$$

где N_A – число Авогадро; r_{mat} , M_{mat} – плотность и молярная масса материала элемента частицы соответственно; Δa – параметр кубического элемента.

Основной вклад в атомный магнитный момент многоэлектронного атома вносит электронная оболочка [8]. Для полного квантового описания многоэлектронной оболочки необходимо знать её конфигурацию, т.е. число электронов с заданными квантовыми числами l и n , и полные моменты – орбитальный L и спиновый S .

Эффективный магнитный момент атома можно рассчитать по формуле:

$$(m_J)_{MAX} = g_J J m_B. \tag{8}$$

Здесь

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} - \text{фактор Ланде}$$

многочелюстного атома, $J = L \pm S$ – суммарное квантовое число полного момента электронной оболочки атома, $m_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ – магнетон Бора.

Подставив (7) и (8) в выражение для силы (6), получим:

Подставив (7) и (8) в выражение для силы (6), получим:

$$\begin{cases} F_x = \sum_{i=1}^k (m_J)_{MAX} \frac{N_A r_{mat} \Delta a^3}{M_{mat}} grad B_{x_i}, \\ F_y = \sum_{i=1}^k (m_J)_{MAX} \frac{N_A r_{mat} \Delta a^3}{M_{mat}} grad B_{y_i}, \\ F_z = \sum_{i=1}^k (m_J)_{MAX} \frac{N_A r_{mat} \Delta a^3}{M_{mat}} grad B_{z_i}. \end{cases} \tag{9}$$

Из выражения для силы (9) следует, что ускорение частицы зависит не столько от величины поля, сколько от его неоднородности, а также свойств материала. Материал должен обладать высокой магнитной восприимчивостью, чтобы можно было допустить полную ориентированность моментов по линиям внешнего поля и, кроме того, электронная оболочка атомов вещества должна обладать максимальным магнитным моментом. Больше всего этим параметрам отвечают элементы группы железа и некоторые редкоземельные металлы. Параметры некоторых из них приведены в табл.1.

Таким образом, все усилия по увеличению ускоряющей силы необходимо направить на увеличение неоднородности поля по направлению движения частицы и при этом необходимо сохранить однородность поля по другим направлениям, чтобы не вызвать сильного отклонения от прямолинейной траектории. Для этого необходимо рассмотреть разные конструкции тяговых катушек и построить картину поля, создаваемого ими.

Таблица 1. Некоторые термы элементов группы железа

Атомный номер	Элемент	Электронная конфигурация внешней оболочки	g_J	$g_J J, [m_B]$
65	Tb	$4f^8 5d 6s^2$	24/12	12
67	Ho	$4f^{11} 6s^2$	18/15	9
23	V	$3d^3 4s^2$	2/5	0,6
24	Cr	$3d^5 4s$	2	6
25	Mn	$3d^5 4s^2$	2	5
26	Fe	$3d^6 4s^2$	3/2	6
27	Co	$3d^7 4s^2$	4/3	6
28	Ni	$3d^8 4s^2$	5/4	5
29	Cu	$3d^{10} 4s^2$	2	1

Расчёт движения частицы по тракту одноступенчатого электромагнитного ускорителя осуществлён численным методом, позволяющим отказаться от интерполяции функции по точкам сетки поля. Это достигается тем, что поле считается не во всём тракте, а локально в окрестностях ускоряемой частицы, в точках адап-

тивной сетки, совпадающей с сеткой разбиения тела. Таким образом, все расчётные точки поля совпадают с координатами центра масс элементов объёма тела. После расчёта градиента поля и определения силы, действующей на тело, определяется смещение координат сетки тела за интервал времени и осуществляется но-

вый локальный расчёт области поля. Такой подход позволяет создавать максимально полную эволюционную модель, так как на каждом шаге основного цикла есть возможность оценивать изменения всех параметров вследствие процессов,

протекающих в предыдущий момент времени. Перемещение тела определяется из координат центра масс, рассчитанных в каждый момент времени по следующим соотношениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_x^{(t)} = \frac{F_x^{(t)}}{m}, \\ a_y^{(t)} = \frac{F_y^{(t)}}{m}, \\ a_z^{(t)} = \frac{F_z^{(t)}}{m}, \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} v_x^{(t)} = v_x^{(t-dt)} + a_x^{(t)}t, \\ v_y^{(t)} = v_y^{(t-dt)} + a_y^{(t)}t, \\ v_z^{(t)} = v_z^{(t-dt)} + a_z^{(t)}t, \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} X^{(t)} = X^{(t-dt)} + v_x^{(t-dt)}t + \frac{a_x^{(t)}t^2}{2}, \\ Y^{(t)} = Y^{(t-dt)} + v_y^{(t-dt)}t + \frac{a_y^{(t)}t^2}{2}, \\ Z^{(t)} = Z^{(t-dt)} + v_z^{(t-dt)}t + \frac{a_z^{(t)}t^2}{2}. \end{array} \right.$$

Анализ магнитного поля катушек

Рассмотрим срез поля катушки, через которую пропущен ток в один ампер. Конструктивные параметры и величина магнитной индукции поля представлены на рис.1. Из графика магнитного поля видно, что максимальная неоднородность поля по оси Z наблюдается в области начала обмоток, внутри катушки ускорение, сообщаемое телу, будет значительно ниже. Также видно, что на всём протяжении катушки магнитная индукция увели-

чивается при движении от оси катушки к границе обмотки, что неизбежно приведёт к появлению радиальной составляющей силы и вызовет отклонение частицы от прямолинейного направления. Прежде, чем перейти непосредственно к моделированию движения частицы, проведём анализ конструкций нескольких катушек, чтобы выбрать оптимальный вариант, обладающей максимальной неоднородностью поля по оси движения частицы. Параметры конструкций катушек приведены в табл. 2.

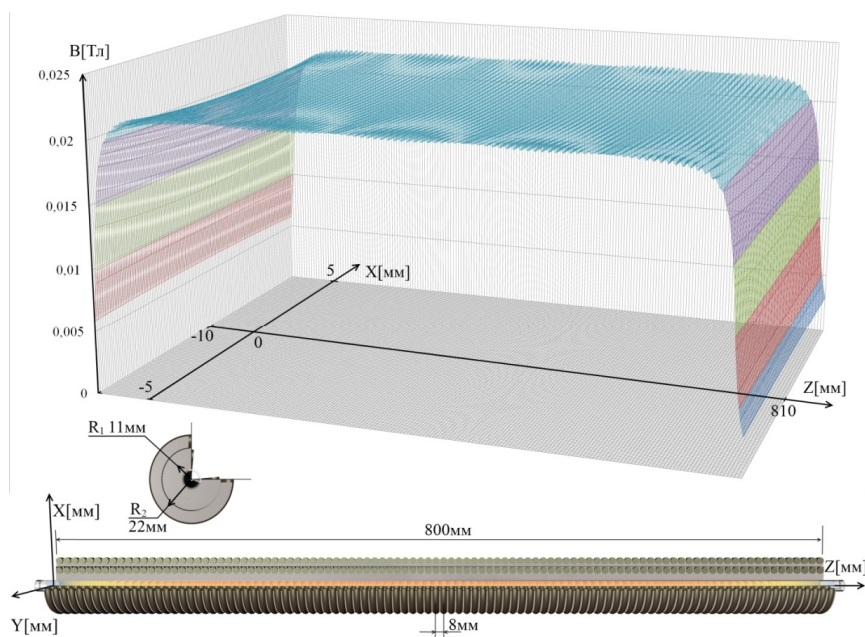


Рис.1. Конструкция и магнитное поле длинной катушки

Таблица 2. Параметры катушек

№ катушки	Количество слоев	Радиусы слоев [мм]	Число витков в одном слое	Межвитковый шаг [мм]	Смещение слоев [мм]
1	2	1-11; 2-22	100	8	0
2	2	1-11; 2-22	100	8	10
3	2	1-11; 2-22	10	8	0
4	1	1-11;	5	8	0
5	5	1-11; 2-17;3-23; 4-29; 5 -35	1	0	0
6	5	1-11; 2-17;3-23; 4- 29; 5 -35	1	0	1
7	5	1-11; 2-17;3-23; 4- 29; 5 -35	1	0	2
8	8	1-11; 2-17;3-23; 4- 29; 5 -35;6-41;7- 47;8-53	1	0	1
9	10	1-11; 2-17;3-23; 4- 29; 5 -35;6-41;7- 47;8-53;9-59;10- 65	1	0	1

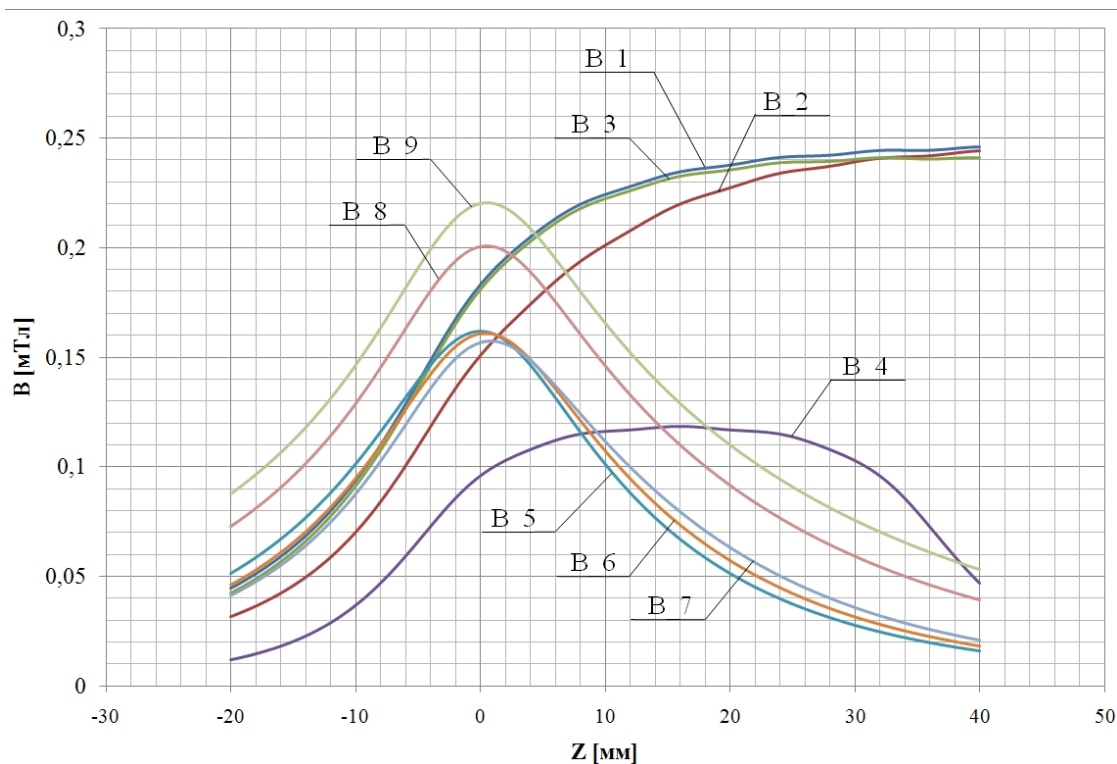


Рис.2. Магнитная индукция катушек различной конструкции при токе в 1А

По выражению (4) была рассчитана магнитная индукция для катушек различных форм. Результаты вычислений вектора магнитной индукции на оси катушек приведены на рис.2. По всем катушкам

течёт одинаковый ток, равный одному амперу.

Из приведённых на рис.2 графиков видно, что максимальную магнитную индукцию создают катушки с номерами 1 и 3, минимальную магнитную индукцию —

однослойная катушка с номером 4, спиральные катушки с номерами 5,6,7 при таком же количестве витков, что и 4, создают почти вдвое большее поле. Более наглядно силовые характеристики катушек отражают графики градиентов полей на осях катушек (рис.3). Из них видно, что почти все катушки при одинаковом токе обладают примерно одинаковыми тяговыми характеристиками. Поэтому выгодно отличаются спиральные катушки с номерами 5-9, так как они обладают более простой конструкцией и малым количеством витков, что позволяет достигать более высоких токов при прочих одинаковых параметрах. Причём спиральные катушки со смещёнными слоями создают больший градиент поля, чем катушки без смещения. Особенностью спиральных катушек является также то, что градиент, а следовательно и ускоряющая сила, резко меняют свой знак при прохождении центра катушки. В цилиндрических многовитковых катушках тоже происходит смена направления силы при прохождении

центра, но характер этого изменения намного более плавный, чем в спиральных. Из этого следует, что требования к синхронизации включения спиральных катушек с положением ускоряемой частицы значительно выше, чем для цилиндрических катушек.

На рис.4 представлены графики градиента магнитного поля, создаваемые катушками (параметры приведены в табл.2), при работе от одного накопителя с энергией 100 КДж. В таком включении токи катушек будут значительно отличаться в зависимости от их индуктивности и сопротивления.

Из графиков рис.4 видно, что максимальный градиент поля по оси Z создаёт катушка с номером 7, и при этом она обладает относительно простой конструкцией и малым количеством витков. Данная конструкция катушки будет использована в дальнейшем при моделировании ускорителя.

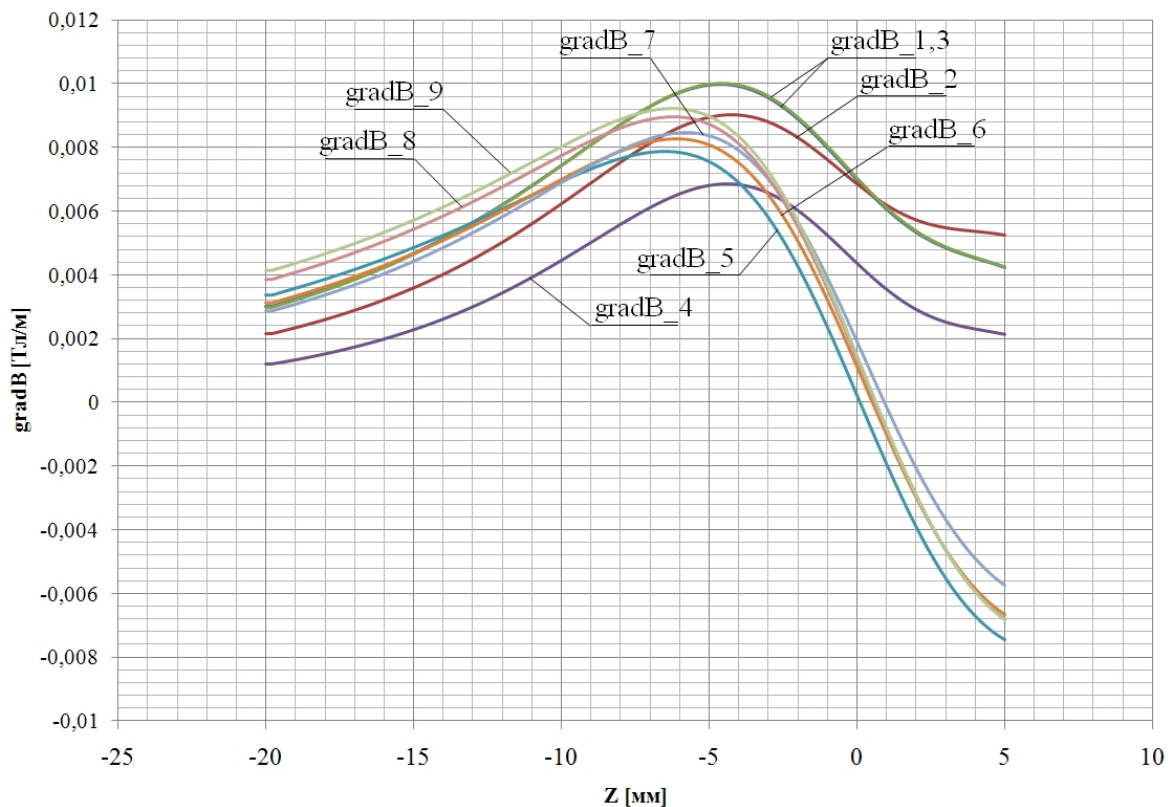


Рис.3. Градиент магнитного поля катушек различной конструкции при токе в 1А

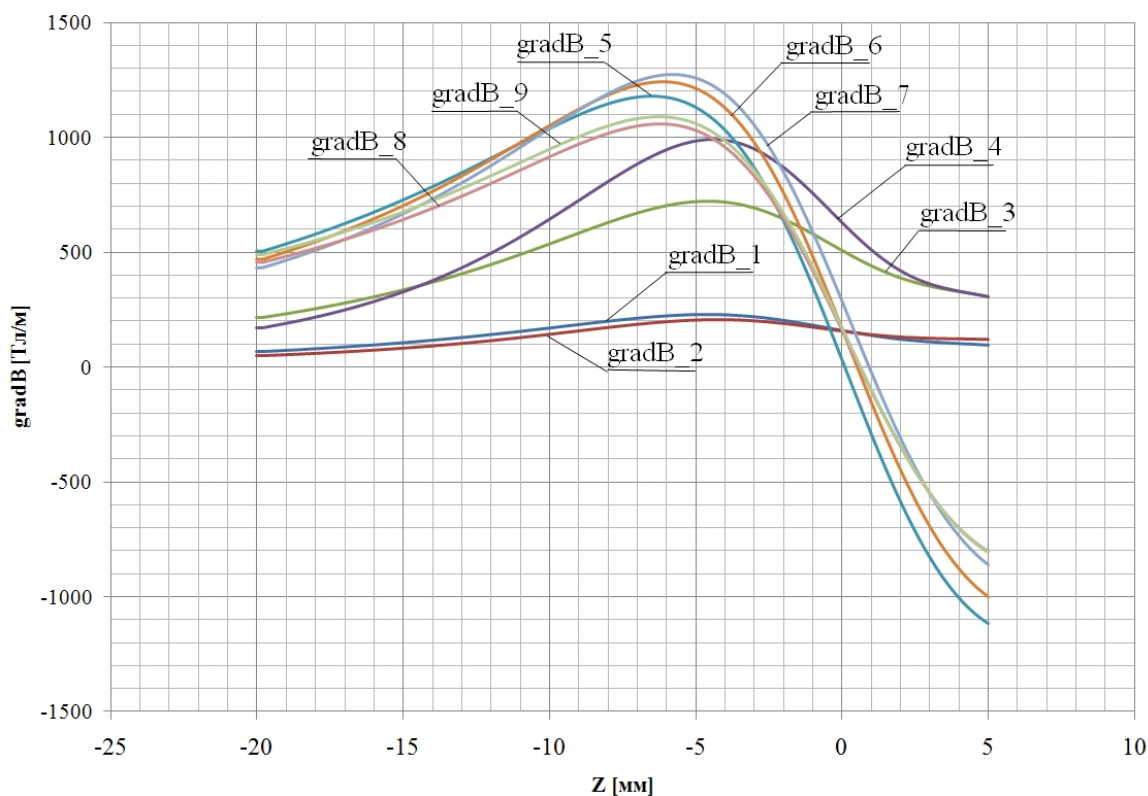


Рис.4. Градиент магнитного поля катушек различной конструкции при работе от одного источника энергии

Моделирование движения частицы

В качестве топологии ускорителя используем резонансный электромагнитный ускоритель [9], так как он обладает максимальной эффективностью передачи энергии от накопителя катушке. В качестве источника энергии используется конденсаторный накопитель с энергией 100 КДж. Рассмотрим начальные условия для выбора оптимальных параметров. Важными из них являются координаты центра масс частицы в момент включения катушки и начальная скорость объекта. Для моделирования массу частицы примем равной 0,11 грамма, что соответствует шарообразному железному объекту диаметром 3 мм. Шаг сетки объекта равен 0,3 мм. Рассматриваемые начальные условия приведены в табл.3.

Таблица 3. Начальные условия

№	Масса [мг]	Смещение по оси Z [мм]	Смещение по оси X [мм]	Смещение по оси Y [мм]
1	110	-12	0	0
2	110	-12	1	2
3	110	-12	3,5	0,5
4	110	-10	0	0
5	110	-5	0	0
6	110	-1	0	0

На рис.5 приведены графики скорости частиц для разных начальных положений центра масс объекта. Рассматриваемый интервал времени в графиках скорости соответствует одному полупериоду колебательного процесса, возникающему в каждой ступени резонансного электромагнитного ускорителя. График тока, протекающего через тяговый соленоид, для наглядности приведён на рис.5.

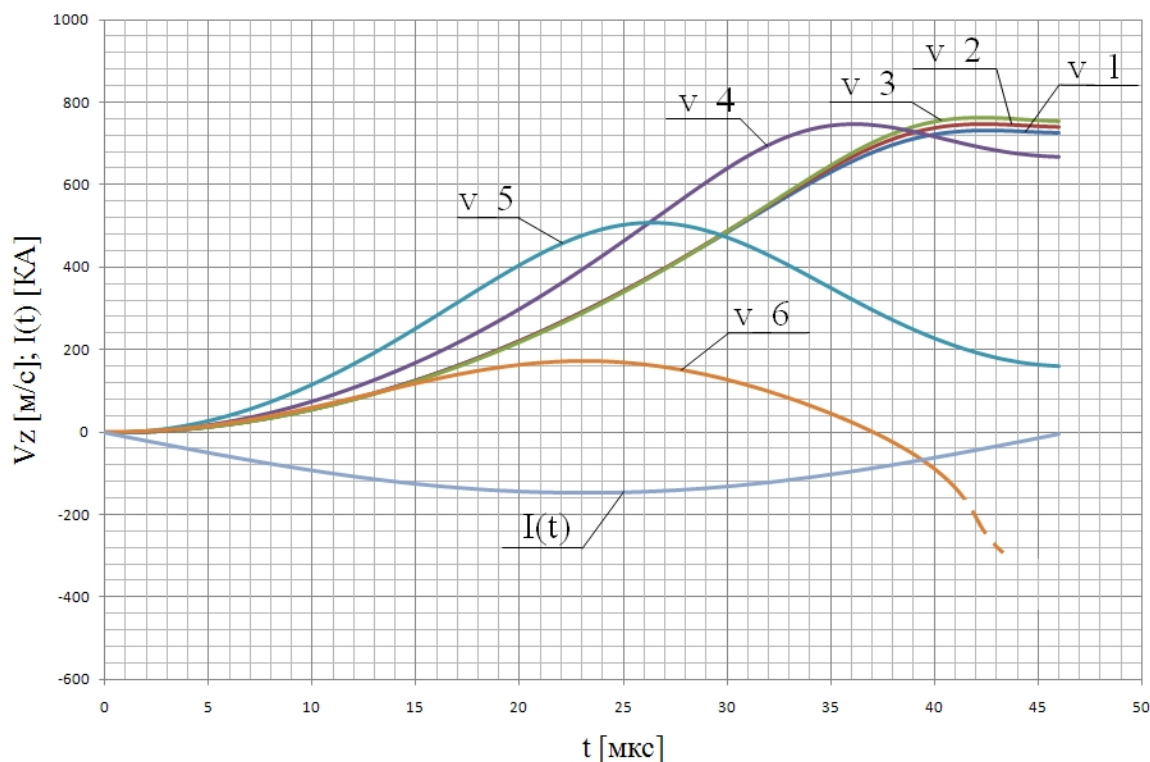


Рис.5. Vz-составляющая скорости частицы при различных начальных условиях и ток катушки

По результатам моделирования ускорения тела при разных начальных координатах можно сделать вывод, что координаты частицы в момент включения сильно влияют на конечную скорость (рис.5). Графики под номерами 1-3 (рис.5) соответствуют оптимальным начальным условиям из табл.3, так как имеют максимальное значение конечной скорости объекта. Это объясняется тем, что в момент, когда частица подлетает к центру катушки, происходит размыкание цепи и ток через катушку не протекает. Такой режим создаёт максимальное ускорение частицы по оси катушки. На рис.6 приведены графики изменяя X и Y координат частицы, возникающие в процессе ускорения. Эти графики наглядно показывают отклонение частицы от прямолинейной траектории движения.

При малом смещении частицы по оси Z, которому соответствуют начальные условия под номером 4-6 в табл.3, частица начинает терять скорость уже на четверти периода тока (рис.5). При этом она начинает сильно отклоняться от прямолинейной траектории движения (график Y4 на рис.6). Это объясняется тем, что градиент поля по направлениям X и Y внутри катушки сильно возрастает (рис.7). Центр катушки совпадает с началом координат. Магнитная частица, попавшая в эту область, будет притягиваться к виткам катушки, отклоняясь от прямолинейной траектории.

Влияние массы и материала частицы на конечную скорость приведено на рис.8. В табл.4 приведены параметры моделируемых частиц.

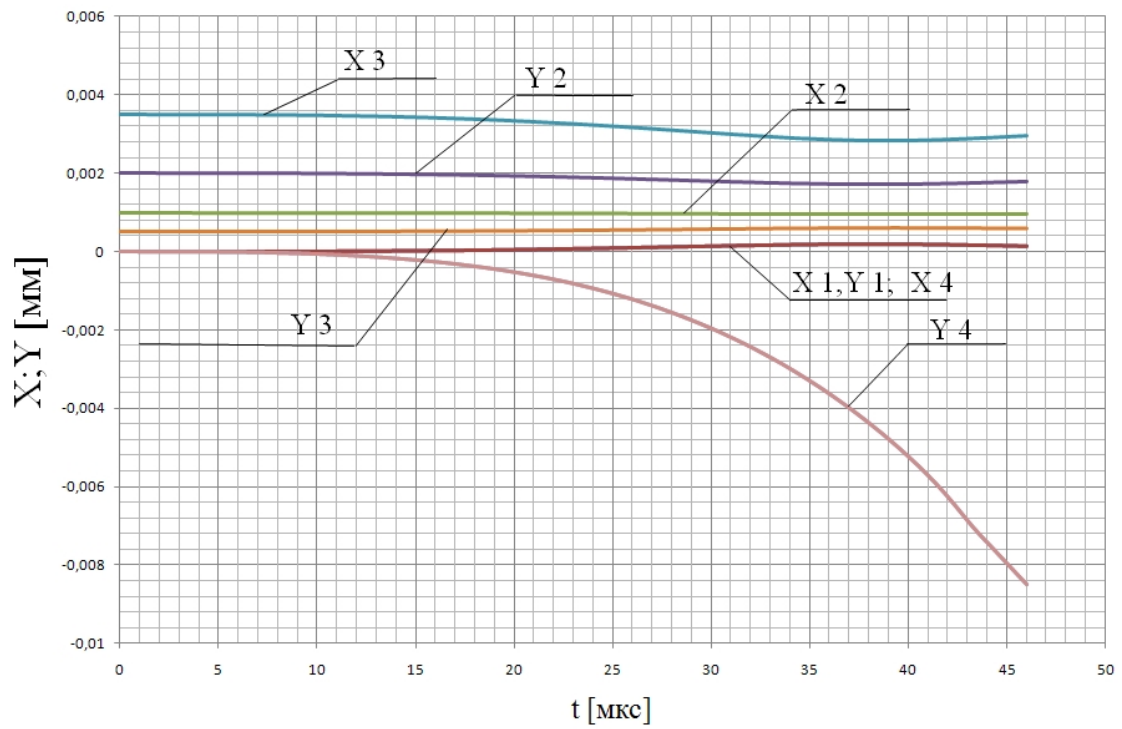


Рис.6. Отклонение частицы от прямолинейной траектории по X и Y координатам

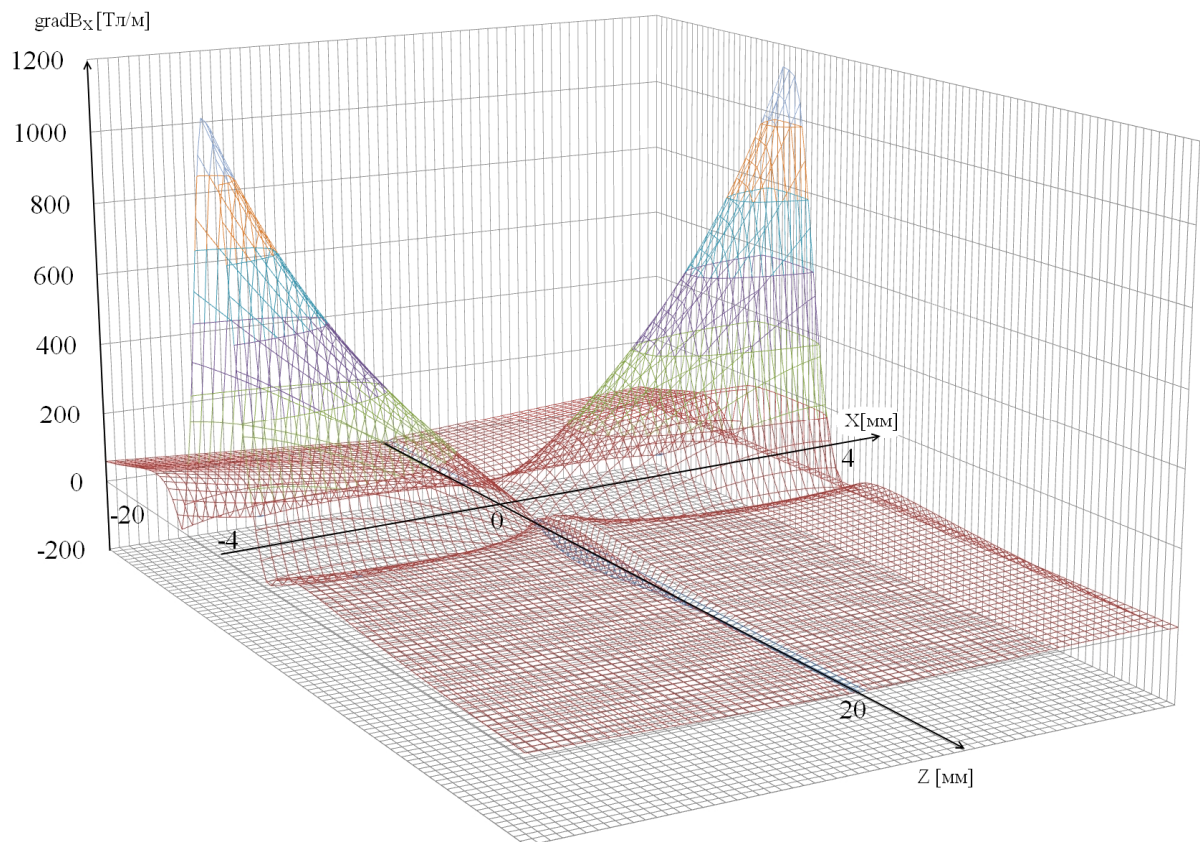


Рис.7. Градиент магнитной индукции поля по направлению оси X

Таблица 4. Параметры частиц

№	Масса частицы [г]	Материал частицы	Плотность материала [г/см ³]	Молярная масса [г/моль]	$g_J J, [m_B]$
1	2,1	Fe	7,874	55,847	6
2	2,1	Co	8,9	58,9332	6
3	2,1	Ni	8,902	58,6934	5
4	2,1	Ho	8,795	164,93032	9
5	2,1	Tb	8,229	158,92534	12
6	0,11	Fe	7,874	55,847	6
7	0,11	Co	8,9	58,9332	6
8	0,11	Ni	8,902	58,6934	5
9	0,11	Ho	8,795	164,93032	9
10	0,11	Tb	8,229	158,92534	12
11	0,00008	Fe	7,874	55,847	6

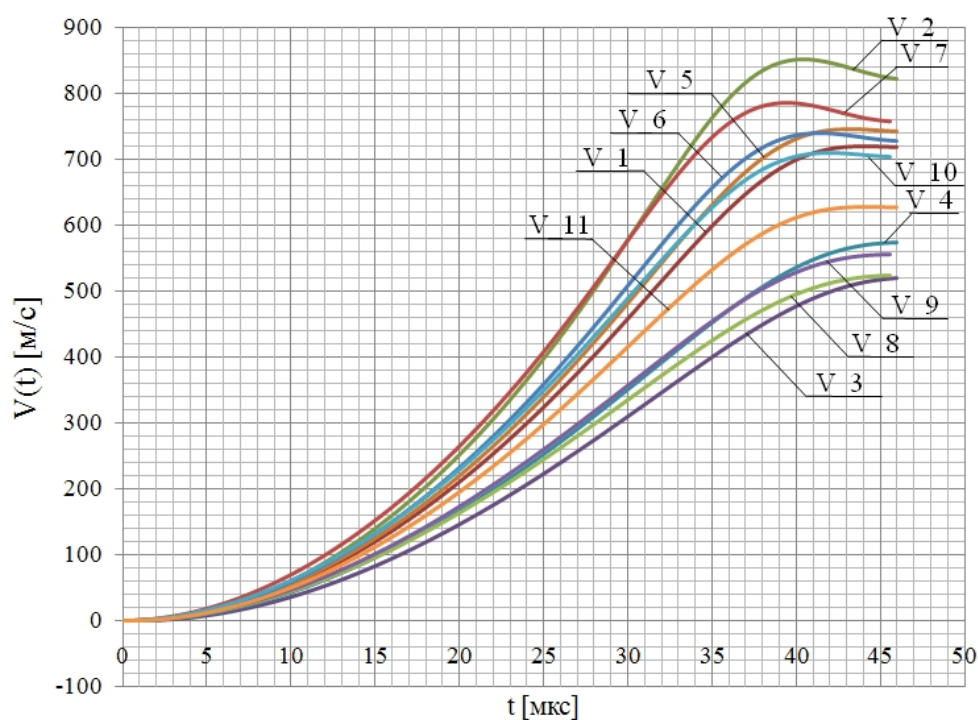


Рис.8. Зависимость скорости частиц разной массы и материала от времени

Из графиков на рис.8 видно, что масса частиц в диапазоне от 0,1 мкг до нескольких граммов на конечную скорость оказывает слабое влияние. Это связано с тем, что сила действующая на магнитное тело, линейно зависит от массы тела. При уменьшении массы объекта линейно уменьшается его собственный магнитный момент и, следовательно, ускоряющая сила.

В результате анализа работы одной ступени резонансного катушечного электромагнитного ускорителя можно сделать вывод, что оптимальным является центральное расположение частицы с удалением от центра катушки, равным диаметру внутренних витков. Наиболее неоднородное поле создает спиральная катушка со смещением витков. Приведённая математическая модель одной ступени резо-

нансного электромагнитного ускорителя применима для анализа ускорения только ферромагнитных частиц, поскольку необходимо соблюдение условия сонаправленности магнитных моментов доменов вещества. Следует заметить, что для реальных испытаний необходимо выбирать материал с более высокой температурой Кюри. В процессе ускорения материал будет нагреваться из-за деформаций и поэтому тело может выйти из состояния намагниченности и прекратить взаимодействие с внешним магнитным полем. Моделирование показало, что одна ступень даёт приращение энергии частицы массой 2,1 грамма, равное 540Дж, что составляет 0,5% от энергии накопителя, и при этом из накопителя расходуется 750Дж, что соответствует эффективности ускорения, равной 75%.

Заключение

1. При принятых допущениях и оптимальных начальных условиях согласно результатам моделирования можно заключить, что все ступени резонансного электромагнитного катушечного ускорителя наиболее эффективно передают энергию ферромагнитным объектам большей массы и объёма.

2. Ступени ускорителя дают конечное приращение энергии, которое невозможно увеличить без применения сверхпроводников и дальнейшего повышения напряжения накопителя.

3. Резонансный электромагнитный катушечный ускоритель целесообразно делать многоступенчатым (более 100 ступеней), чтобы израсходовать всю энергию накопителя и придать максимальную скорость частице. Многоступенчатая конструкция обеспечивает более плавное ускорение тел, чем другие типы электромагнитных ускорителей макротел. Эту особенность можно применить для ускорения макротел, не терпящих перегрузку, до высоких скоростей.

4. Перечисленные особенности делают применение катушечного электромагнитного ускорителя нецелесообразным

для ускорения ферромагнитных макротел и имитации воздействия условий космической среды.

Библиографический список

1. Акишин, А.И. Космическое материаловедение [Текст]: метод. и учеб. пособие / А.И. Акишин. – М.: Изд-во МГУ им. Ломоносова, – 2007. – С.209.

2. Becker, D.G. Variable-Ferquence Radially-Stable Micrometeoroid Accelerator [Text]/ D.G. Becker, J.F. Friichtenicht, B. Hamermesh, R. V. Langmuir// Review of Scientific Instruments.- 1965.-Vol.36, #10, - P. 1480-1481.

3. Моделирование частиц космического мусора с помощью электромагнитного и электроплазменного ускорителя [Текст]/ Н.Д. Семкин, К.Е. Воронов, А.М. Телегин [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – Самара: ФВПиРТС, – 2012. – №1. – С.79-85.

4. Парселл, Э. Электричество и магнетизм [Текст]: учеб. / Э. Парселл; изд. 3-е, испр. – М.: Наука, 1983. – Т. II. – С. 205-211.

5. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи [Текст]/ Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 580 с.

6. Парселл, Э. Электричество и магнетизм [Текст]: учеб. / Э. Парселл; изд. 3-е, испр. – М.: Наука, 1983. – Т. II. – С. 355-363.

7. Парселл, Э. Электричество и магнетизм [Текст]: учеб. / Э. Парселл; изд. 3-е, испр. – М.: Наука, 1983. – Т. II. – С. 373-379.

8. Вонсовский, С.В. Магнетизм, Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро и ферримагнетиков [Текст]/ С.В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – С.24-32.

9. Пат. 2466340 С1 Российская Федерация. Резонансный электромагнитный ускоритель [Текст] / Сухачев К.И., Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е. Оpubл. 10.11.2012.

ANALYSIS OF POTENTIALITIES OF COIL ELECTROMAGNETIC ACCELERATORS FOR THE ACCELERATING OF FERROMAGNETIC PARTICLES

© 2013 K. I. Sukhachev, N. D. Syomkin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev.
(National Research University)

The paper presents an analysis of coil electromagnetic accelerators. Physical limits on the maximum acceleration imparted to a ferromagnetic body are defined. Mathematical modeling of a single-stage coil electromagnetic accelerator has been carried out including three-dimensional simulation of the particle trajectory. The influence of parameters of traction coils, the initial conditions and the particle material on the final speed is analyzed.

Solenoid coil accelerator, resonant accelerator ferromagnets, modeling of the magnetic field and the accelerating force.

Информация об авторах

Сухачёв Кирилл Игоревич, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kir.sukhachev@gmail.com. Область научных интересов: физика ускорителей.

Сёмкин Николай Данилович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: semkin@ssau.ru. Область научных интересов: аэрокосмическое приборостроение, космические исследования.

Sukhachev, Kirill Igorevitch, post-graduate student, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: kir.sukhachev@gmail.com. Area of research: physics of accelerators.

Syomkin, Nikolay Danilovitch, doctor of technical science, professor, professor of the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: semkin@ssau.ru. Area of research: aerospace instrument engineering, space research.