

01;12

## О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ПРОВОДЯЩЕГО КОЖУХА НА РАЗГОН ТЕЛ В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ

© М.П.Галанин, А.В.Плеханов, Ю.П.Попов, С.С.Храмцовский

Институт прикладной математики РАН, Москва, Россия  
(Поступило в Редакцию 25 мая 1995 г.)

Представлены результаты численного моделирования процесса электродинамического ускорения проводящих макротел в ускорителе типа рельсотрон при наличии внешнего экрана. Влияние экрана проявляется в изменении погонной индуктивности устройства, являющейся основной характеристикой рельсотрона. Описаны несколько серий проведенных вычислений на ЭВМ, приведен анализ полученных результатов. Показана, в частности, возможность увеличения погонной индуктивности при использовании магнитных материалов в кожухе.

### Введение

Для компенсации значительных расталкивающих усилий, возникающих в электродинамических ускорителях при выстреле, ускоритель заключается в специальный кожух (экран). Кожух обеспечивает необходимую жесткость конструкции. Часто он изготавливается из проводящего материала, поэтому во время разгона тела в толще кожуха возникают токи, индуцированные меняющимся магнитным полем. Настоящая работа посвящена исследованию влияния этих токов на погонную индуктивность ускорителя типа рельсотрон, являющуюся одним из основных параметров, характеризующим процесс разгона метаемог тела. Изучение проводится методами вычислительного эксперимента.

Идеализированная схема рассматриваемого рельсотрона показана на рис. 1. На рисунке обозначены границы различных составляющих рельсотрона ( $r_i$ ,  $z_i$ ) и их размеры ( $l_{ri}$ ,  $l_{zi}$ , где  $l_{ri} = r_i - r_{i-1}$ ,  $l_{zi} = z_i - z_{i-1}$ ). По рельсам ( $l_{r2}$ ,  $\varphi_1$ ) течет ток, который создает магнитное поле. Оно действует на проводник с током (проводящий якорь  $l_{z2}$ ,  $l_{r1}$ ) и ускоряет его. Протекающий через рельсы полный ток считается известным. Рельсотрон укрыт со всех сторон (кроме торцов, перпендикулярных  $z$ ) проводящим кожухом ( $l_{r4}$ ). Все внутреннее пространство рельсотрона (помимо рельса и якоря) заполняет однородный диэлектрик. Внешний радиус  $r_5$  (рис. 1 показан штриховой линией) представляет собой

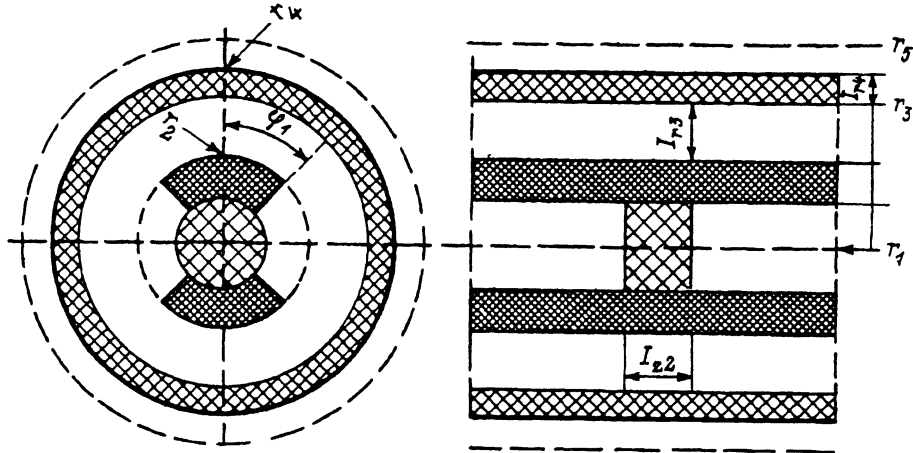


Рис. 1. Сечения релсыотрона плоскостями  $z = \text{const}$  и  $\varphi = 0$ .

границу рассматриваемой пространственной области по радиусу, на которой при численном моделировании задаются искусственные краевые условия. Геометрические характеристики и компоновка рассматриваемого ускорителя соответствуют [1] и являются типичными для рассматриваемых устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 93-01-00634).

## 1. Математическая постановка задачи

Будем описывать электромагнитные поля следующей системой уравнений [2,3]:

$$\frac{D\mathbf{B}}{Dt} - (bfv, \nabla)\mathbf{B} = \text{rot}([\mathbf{u} \cdot \mathbf{B}] - \mathbf{E}),$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = 4\pi\sigma\mathbf{E} = 4\pi\mathbf{j}, \quad \text{div } \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu\mathbf{H},$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} + \rho(\mathbf{w}, \nabla)\epsilon = (\mathbf{j}\mathbf{E}). \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{H}$  — напряженность магнитного поля;  $\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля в системе координат, в которой вещество покоится;  $\mathbf{B}$  — магнитная индукция;  $\mu$  — магнитная проницаемость;  $\mathbf{j}$  — плотность тока;  $\sigma$  — электропроводность;  $\mathbf{u}$  — скорость движения вещества;  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор;  $t$  — время. Используются также температура  $T$ , плотность  $\rho$ , удельная теплоемкость  $c_v$ , удельная внутренняя энергия  $\epsilon = \int c_v dT$ . Система уравнений (1) записана в безразмерном виде.

В (1) использованы смешанные эйлерово-лагранжевые (СЭЛ) переменные [4], под которыми понимаются начальные координаты частиц заданного объема, перемещающегося по  $y$  со скоростью движения  $v$ . В дальнейшем считаем  $v$  равной скорости движения якоря. Переход от производных по  $t$  при фиксированных эйлеровых переменных  $\partial/\partial t$  к

производным  $\frac{D}{Dt}$  при фиксированных СЭЛ переменных  $D/Dt$  осуществляется по правилу

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla).$$

В (1) используется  $\mathbf{w} = \mathbf{u} - \mathbf{v}$ .

Для получения полной постановки задачи систему уравнений (1) необходимо дополнить начальными и граничными данными. Здесь они для краткости опущены. Укажем лишь, что в представленной модели считается, что к каждому рельсу с торца  $z = 0$  подсоединены бесконечно тонкие проводники, по которым протекает заданный ток  $I(t)$ . Он создает тангенциальное магнитное поле, вычисляемое так же как поле бесконечно длинного прямолинейного проводника с током, а на противоположном торце поле  $\mathbf{H}_\tau$  нулевое. Индексы  $n$  или  $\tau$  здесь и далее указывают на нормальную или тангенциальную по отношению к границе компоненту вектора.

Кроме уравнений, приведенных выше, используется еще уравнение движения якоря массы  $m$ , занимающего область  $\mathcal{Y}$ , под действием силы Лоренца. Для определения положения  $l_{\text{я}}$  ускоряемого тела решается специальная задача. Общая задача решается до тех пор, пока  $l_{\text{я}}$  не достигнет  $l_{\text{max}}$ . Тем самым данная модель является самосогласованной и позволяет описывать процесс электродинамического ускорения полностью. Задаваемой извне характеристикой является лишь полный ток, протекающий через ускоритель.

Электромагнитную часть задачи (1) можно свести к одному уравнению путем введения потенциалов [3]. Приведем задачу для определения  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  с использованием СЭЛ переменных.

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A},$$

$$\mathbf{E} = [\mathbf{u} \text{ rot } \mathbf{A}] - \frac{D\mathbf{A}}{Dt} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{A}. \quad (2)$$

Тогда векторный потенциал  $\mathbf{A}$  описывается следующим образом:

$$4\pi\sigma \left\{ [\mathbf{u} \text{ rot } \mathbf{A}] - \frac{D\mathbf{A}}{Dt} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{A} \right\} = \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} \right) - \theta(\sigma) \text{grad} \left( \frac{1}{\mu} \text{div } \mathbf{A} \right), \quad (3)$$

где

$$\theta(\sigma) = \begin{cases} 0, & \sigma > 0 \\ 1, & \sigma = 0 \end{cases}.$$

Найдя решение (3), по формулам (2) можно определить интересующие нас физические поля.

Введение функции  $\theta(\sigma)$  с дополнительным слагаемым позволяет использовать одно уравнение для диэлектрической и проводящей под областей, сохранить пространственную однородность модели и не использовать скалярный магнитный потенциал. Задача (3) дополняется соответствующими начальными и граничными условиями. В частности, в рассматриваемой модели используется ограниченная пространственная область для моделирования бесконечной. При этом необходимо ставить граничные условия на искусственной границе  $r = r_5$ . В данной работе использовалось два варианта таких условий  $\mathbf{A}_\tau = 0$  или

$H_r = 0$  на внешней границе. Некоторые подробности их применения описаны ниже.

Задача (3) решается одновременно с другими частями полной задачи описанной выше.

Для численного решения поставленной задачи использовался метод конечных разностей [2]. Разностная схема для подобной задачи разработана и описана в [5]. В работах [5,6] приведены подробности постановки задачи, в том числе задания начальных и граничных условий, а также некоторые результаты численного моделирования трехмерных нестационарных электродинамических явлений в рельсотронах.

## 2. Результаты расчетов и их обсуждение

Во всех проведенных расчетах пространственная область состояла из подобластей диэлектриков и проводников. В качестве основных проводящих материалов в расчетах брались бронза и алюминий с постоянными характеристиками. Далее используются следующие размеры у числовых характеристик: время в мс, длины в см, скорость в  $10^3$  (ом · см) $^{-1}$ , ток в МА.

а) **Предварительные расчеты.** Для выяснения влияния некоторых геометрических параметров ускорителя на получаемые результаты был проведен ряд предварительных расчетов. Прежде всего следует определить границу расчетной области по радиусу, на которой ставятся искусственные граничные условия. В проведенной серии расчетов внешняя граница кожуха  $r_4$  фиксировалась, а величина  $r_5$  варьировалась в некоторых пределах с соответствующим изменением числа ячеек на последнем участке по  $r$ . Полученные результаты практически не отличались друг от друга. Граничное условие равенства нулю  $A_r$  при  $r = r_5$  хорошо соответствовало действительности, так как кожух обладал большой проводимостью и практически вся энергия электромагнитного поля была сосредоточена внутри кожуха.

При других значениях  $\sigma$  и  $\mu$  заметная часть энергии электромагнитного поля просачивается за его пределы. Для оценки достоверности результатов были проведены дополнительные расчеты, в которых на границе  $r = r_5$  задавалось условие  $H_r = 0$ . Размеры рельсотрона по радиусу брались следующими: 4,5, 9, 11, 12, 17, ( $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$ ). Электrofизические параметры кожуха изменялись так, чтобы можно было сравнить результаты при двух типах граничного условия для различных комбинаций  $\sigma$  и  $\mu$ . Полученные данные свидетельствуют, что ни погонная индуктивность, ни величина скорости якоря существенно не изменились.

Вид граничного условия определяет, где должны возникнуть токи, чтобы компенсировать воздействие электромагнитного поля рельсотрона на внешней границе. Условие  $A_r = 0$  означает, что на расстоянии  $r_5$  от центра существует фиктивный бесконечно тонкий идеально проводящий кожух, в котором индуцируются такие токи. Условие  $H_r = 0$  приводит к возникновению дополнительных токов во внешней части реального кожуха. Из этого следует, что в рамках представленной модели условие равенства нулю тангенциальной компоненты векторного потенциала является предпочтительным типом искусственного граничного условия.

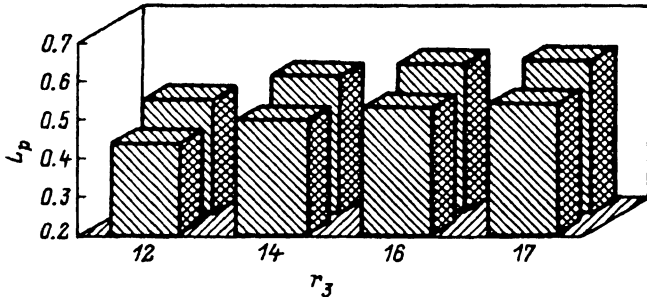


Рис. 2. Изменение минимальной и максимальной величины погонной индуктивности (ближний и дальний ряды) в ходе расчетов при изменении толщины экрана за счет его внутреннего радиуса.

При предварительных исследованиях изучалось влияние количества ячеек сетки на качество получаемых результатов, что позволило определить и далее использовать достаточную (для получения устойчивых результатов) сетку. С аналогичной целью проводились расчеты и с различными значениями  $z_1$ , влияющими на значения получаемой погонной индуктивности (подробнее о сходной проблеме см. в [6]).

б) Исследование влияния геометрических размеров кожуха на характеристики ускорителя. Выделим один расчет (основной). Он был проведен при следующих характеристиках ускорителя [1]: границы по  $r$  (рис. 1;  $r_1 = 4.5$ ,  $r_2 = 9$ ,  $R_3 = 14$ ,  $r_4 = 18$ ,  $r_5 = 22$ ); границы по  $\varphi$  (рис. 1;  $\varphi_1 = \pi/4$ ,  $\varphi_2 = \pi/2$ ); границы по  $z$  (рис. 1;  $z_1 = 12$ ,  $z_2 = 15.2$ ,  $z_3 = 23.2$ ); координаты токоподвода ( $r_0 = 8.8$ ,  $\varphi_0 = 0$ ); параметры материалов соответствуют якорю и кожуху из Al, рельсу из бронзы; ток  $I$  изменяется от нуля при  $t = 0$  до величины  $I_0 = 1.132$ , а далее спадает; начальная скорость  $v_0 = 300$ .

Результаты этого и дальнейших расчетов были зафиксированы на один момент времени (в пределах точности)  $t = 0.478$ , к которому процесс уже вышел на стадию равномерного разгона. В качестве выходных данных расчетов использовались минимальное и максимальное за просчитанный промежуток времени значения погонной индуктивности ( $L_{p1}$  и  $L_{p2}$  соответственно).

В первой серии расчетов исследовалось влияние толщины кожуха на величину погонной индуктивности ускорителя. Сначала фиксировалась величина внешнего радиуса кожуха  $r_4$ , а варьировалась его внутренняя граница  $r_3$ . Результаты расчетов показаны на рис. 2. Из них следует, что при увеличении толщины кожуха за счет уменьшения толщины изолятора эффективность ускорителя снижается (на 20% при увеличении  $r_3$  в 1.4 раз). Затем фиксировалась внутренняя граница кожуха и изменялась величина  $r_4$ , которая бралась равной 18 : 16 : 19. Полученные при этом значения погонной индуктивности практически не отличались друг от друга.

Сравнение результатов расчетов вариантов данной серии показывает, что при выбранных фиксированных характеристиках материала кожуха изменение его толщины в рассмотренных пределах не оказывает существенного влияния на процесс разгона. При этом не рассматривались достаточно малые значения  $I_{r4}$ .

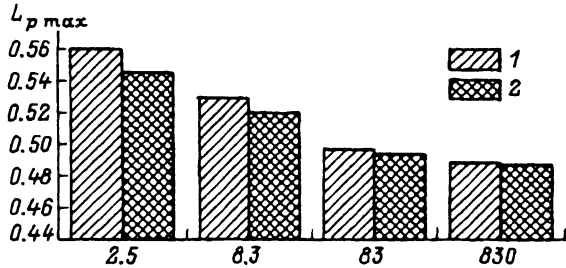


Рис. 3. Уменьшение значения погонной индуктивности ускорителя при увеличении проводимости материала кожуха для двух различных значений его толщины.

$L_{r4}$ : 1 — 1.0, 2 — 3.0.

Влияние параметров кожуха на процесс электромагнитного разгона определяется через воздействие токов, индуцируемых в толще кожуха меняющимся магнитным полем. При этом магнитное поле проникает на некоторую конечную глубину от внутренней поверхности кожуха. Чем ближе кожух располагается к рельсам, тем сильнее должно сказываться влияние полей, связанных с токами в кожухе. Результаты расчетов подтверждают это. Практически одинаковые результаты, полученные в расчетах с переменным  $r_4$ , дают основание считать, что при взятых параметрах токи, индуцированные в кожухе, протекают в слое толщиной меньше, чем бралось  $I_{r4}$  в расчетах этой серии. Тем самым за пределы ускорителя не проникало сколько-либо существенной доли энергии электромагнитного поля.

в) Изучение влияния электропроводности материала кожуха. Оно проведено при фиксированной величине радиуса внутренней границы  $r_3 = 11$  ( $I_{r3} = 2$ ) и двух толщинах кожуха 3 и 1. Значение  $r_3$  выбрано меньшим, чем ранее, с целью усиления влияния токов, протекающих в кожухе, на параметры рельсотрона. Результаты расчетов приведены на рис. 3. Расчетные варианты в данном разделе отличались значениями электропроводности кожуха, при этом его электрофизические характеристики не соответствовали какому-либо определенному материалу.

Кроме представленной выше серии расчетов, были просчитаны варианты и при более удаленном от рельсов кожухе ( $r_3 = 14$ ,  $r_4 = 18$ ). Здесь магнитная проницаемость материала кожуха была взята равной 1.3. Три варианта были просчитаны при электропроводности в них 20 : 83 : 200. Соответственно значения погонной индуктивности в максимуме составили 0.570 : 0.565 : 0.564. Таким образом, характер зависимости сохранился таким же, что и в приведенных выше сериях, но в количественном выражении эти изменения менее заметны.

Полученные зависимости могут быть объяснены исходя из уравнений (1) для диффузии магнитного поля [7]. Из них следует, что при уменьшении электропроводности материала кожуха токи индуцируются на большую глубину, являющуюся глубиной проникновения магнитного поля. Эти токи в соответствии с уравнениями Максвелла компенсируют влияние внешнего магнитного поля внутри кожуха. Суммарное воздействие магнитного поля таких токов при достаточной толщине материала будет давать одинаковый нуль, начиная с определенной толщины кожуха, во всех случаях. Во внутренней же части ускорителя результат взаимодействия полей будет некоторым образом зависеть от толщины слоя в кожухе, в котором возникают сколько-либо су-

	$r_3 = 11, r_4 = 12, \sigma = 8.3$			$r_3 = 11, r_4 = 12, \sigma = 83$		$r_3 = 11, r_4 = 12, \sigma = 83$	
	$\mu = 1$	$\mu = 10$	$\mu = 100$	$\mu = 1$	$\mu = 10$	$\mu = 1$	$\mu = 10$
$L_{p1}$	0.439	0.439	0.439	0.436	0.436	0.436	0.436
$L_{p2}$	0.529	0.560	0.587	0.496	0.5045	0.493	0.495

шественные токи. Результаты расчетов свидетельствуют, что с точки зрения увеличения погонной индуктивности более предпочтительным является распределение индуцированных токов на большую глубину, что достигается уменьшение электропроводности материала кожуха. Правда, отличие в результатах расчетов для случаев электропроводности 830 и 83 является незначительным. При таких значениях  $\sigma$  погонная индуктивность в максимуме равна 0.487, 0.493 (при  $r_4 = 14$ ) и 0.488, 0.496 (при  $r_4 = 12$ ). Это позволяет предположить, что за пределы кожуха магнитное поле в данных вариантах не распространяется. При дальнейшем уменьшении значений электропроводности часть энергии магнитного поля будет уходить за пределы ускорителя. Следовательно, индуцированные в кожухе токи будут создавать менее сильное магнитное поле, что подтверждают результаты расчетов при  $\sigma = 8.3$  и  $\sigma = 2.5$ ; особенно это касается случая  $I_{r4} = 1$ .

г) Влияние магнитной проницаемости материала кожуха. Для выяснения характера зависимости результатов от магнитной проницаемости кожуха было просчитано несколько вариантов с различными значениями  $\mu$  при фиксированном  $r_3 = 11$  и различных значениях пар других параметров:  $r_4 = 12, \sigma = 8.3$ ;  $r_4 = 12, \sigma = 83$ ;  $r_4 = 14, \sigma = 83$ . Результаты расчетов показаны в таблице.

Обращает на себя внимание величина изменения погонной индуктивности при различных электропроводности и толщине кожуха. При  $\sigma = 8.3$  разница в результатах весьма существенна и наблюдается положительный эффект от увеличения магнитной проницаемости.

Причины изменений результатов расчетов (раздел 2 в) и данного должны быть совершенно разными. В случае расчетов, описанных в разделе 2 в, электропроводность материала являлась чисто внутренней характеристикой кожуха и влияла лишь на проникновение в него магнитного поля, если глубина такого проникновения меньше толщины кожуха. Условия разрыва компонент электромагнитного поля на границе раздела сред не содержат в себе параметра электропроводности, т. е. значение  $\sigma$  непосредственно не влияет на поле в диэлектрике. Достаточно условия  $\sigma > 0$  в кожухе, чтобы получить в проводнике равенство нулю нормальной к поверхности раздела компоненты  $E$ . Для магнитной проницаемости это не так. На проникновение магнитного поля в кожух здесь в большей степени влияет отношение величин магнитной проницаемости на границе диэлектрик-кожух. Например, нормальная компонента вектора магнитной напряженности  $H$  претерпевает разрыв, тангенциальные компоненты  $H$  непрерывны, откуда получаем, что вектор  $H$  преломляется на угол, определяемый отношением  $\mu_d/\mu_k$ , где  $\mu_d$  — проницаемость диэлектрика (равная 1),  $\mu_k$  — проницаемость кожуха. Этот эффект должен лежать в основе полученных результатов, так как внутри кожуха  $\mu_k$  при заданных тангенциальных компонентах  $H$  влияет на проникновение магнитного поля так же, как и  $\sigma_k$ . В то же время результаты расчетов в таблице прямо противоположны.

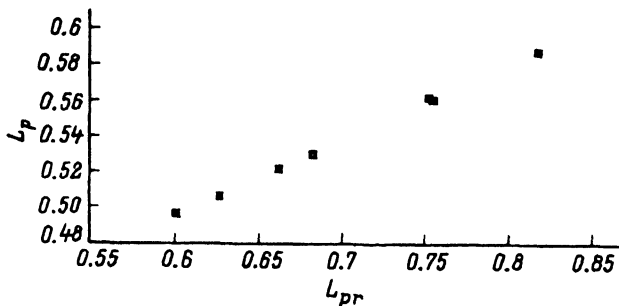


Рис. 4. Зависимость между погонной индуктивностью и коэффициентом  $L_{пр}$ .

Параметр  $\mu$  входит в исходные данные уравнения нелинейным образом, вследствие чего и эффект от его изменения является нелинейным. Вблизи границы  $z = 0$  задание  $\mathbf{H}_\tau$  снаружи ускорителя ведет к увеличению  $\mathbf{V}_\tau$  в кожухе при росте  $\mu$ , что увеличивает  $\mathbf{V}_n$ , сказывающемся уже и на поле в диэлектрике. Взаимодействие компонент поля приводит к тому, что магнитное поле с ростом  $z$  ослабляется меньше при большем  $\mu$ . В результирующем поле проникает в кожух глубже, а соответствующие наводимые в нем токи оказываются меньше. Эффективность ускорения растет. Этот эффект проявляется достаточно заметно при малой (относительно рассматриваемой толщины) электропроводности материала кожуха. В результате получаем, что при малой электропроводности и высокой магнитной проницаемости кожух может служить некоторым аккумулятором электромагнитной энергии, поступающей сначала извне, а в дальнейшем возвращаемой в систему.

д) О связи сил, действующих на рельсы и якорь. Электромагнитное поле в ускорителе взаимодействует со всеми токами, протекающими по проводникам, в том числе и с текущими по рельсам. Возникающая сила имеет значительную радиальную составляющую, ведущую к расталкиванию рельсов. Оно может быть столь велико, что выведет ускоритель из строя после первого же метания. В работе [8] указано, что взаимодействие токов, протекающих во внешнем экране и в рельсе, может быть подобрано таким образом, что расталкивающее усилие будет существенно ослаблено.

В ходе наших расчетов отслеживалось значение составляющей силы, действующей на рельс в перпендикулярном относительно движения якоря направлении. Зная действующую силу и полный ток, протекающий через рельсы, вычислялся следующий коэффициент:

$$L_{пр} = 5F_\tau / I^2.$$

По результатам такого исследования для различных вариантов расчетов построена зависимость  $L_{пр}$  от погонной индуктивности рельсопровода. На рис. 4 видна почти линейная зависимость, показывающая, что при большем значении погонной индуктивности ускорителя нужно компенсировать и большие расталкивающие силы. При этом увеличение погонной индуктивности на 10% ведет к увеличению  $L_{пр}$  на 25%. Для данных расчетов оказалось

$$L_p = 0.43L_{пр} + 0.236.$$

При этом коэффициент корреляции  $L_p$  и  $L_{пр}$  составил свыше 99%. Полученная зависимость (если она справедлива в области  $L_{пр} < 0.6$ )



свидетельствует о возможности существования конфигурации устойчива ускорителя, при котором будет достигнуто  $L_{pr} = 0$ . Это возможно при  $L_p = 0.236$ , т.е. за счет существенного (более двух раз) снижения погонной индуктивности. В проведенных расчетах нулевого или отрицательного значения  $L_{pr}$  на наблюдалось.

## Заключение

Методами вычислительного эксперимента исследовано влияние параметров внешнего проводящего кожуха на характеристики ускорителя. Были проведены три основные серии расчетов. Первая из них продемонстрировала негативное влияние возникающих в кожухе токов на эффективность разгона и усиление этого влияния при уменьшении диэлектрической прослойки между проводящими рельсами и кожухом. Вторая и третья серии были посвящены изучению влияния электропроводности и магнитной проницаемости кожуха. Анализ результатов второй серии показал, что при изготовлении кожуха из материалов высокой электропроводности, когда токи в нем сосредоточены в узком слое, погонная индуктивность устойчива оказывается меньше, чем при распределении токов по большей глубине кожуха. При этом, начиная с некоторых значений электропроводности материала, дальнейшее увеличение  $\sigma$  не ведет к изменению результатов. В третьей серии расчетов на результатах сказывается преломление компонент магнитного поля при прохождении границы сред с различной магнитной проницаемостью. Показано, что усиление этого эффекта (достигаемое увеличением  $\mu$  материала кожуха) при определенных других характеристиках положительно сказывается на эффективности разгона. Следует отметить, что при расположении кожуха на относительно большом расстоянии от рельсов все эффекты, полученные в расчетах второй и третьей серий, проявляются очень слабо. Сопоставлены силы, действующие на якорь в продольном направлении и на рельс в поперечном. Результаты расчетов свидетельствуют о принципиальной возможности конструирования кожуха, использование которого позволит получить не расталкивающие, а сжимающие рельсы силы. Однако это может быть достигнуто лишь за счет значительного снижения погонной индуктивности ускорителя. В целом же расчеты показали, что влияние внешнего проводящего кожуха на разгон тел в ускорителе может быть значительным.

## Список литературы

- [1] Holland M., Eggers P.D., Gminto S., Stevenson R.D. AJAA Pap. 1992. N 0085. 11 p.
- [2] Самарский А.А., Попов Ю.П. Расчетные методы решения задач газовой динамики. М.: Наука, 1980. 352 с.
- [3] Стрэттон Дж.А. Теория электромагнетизма. М.; Л, 1948. 540 с.
- [4] Колдоба А.В., Кузнецов О.А., Повещенко Ю.А., Попов Ю.П. Препринт Института прикладной математики им. М.В.Келдыша АН СССР. 1986. № 29. 20 с.
- [5] Галанин М.П., Попов Ю.П., Чублуква Ю.Н. Препринт Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН. 1992. № 32. 34 с.
- [6] Галанин М.П., Игнатко В.П., Попов Ю.П., Храмцовский С.С. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 6. С. 9-20.
- [7] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.
- [8] Drobyshevski E.M., Yuferev S.V. // IEEE Trans. Magn. 1995. Vol. 31. N 1. P. 291-294.