

УДК 537.311.5

ПРЕДЕЛЬНЫЕ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЬСОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЯКОРЕМ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

С. В. Станкевич, Г. А. Швецов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: stankevichsv@mail.ru, shvetsov@hydro.nsc.ru

Представлены результаты трехмерного численного моделирования джоулева нагрева якоря и рельсов в рельсовых ускорителях металлических тел с одним и двумя дополнительными рельсами, создающими внешнее магнитное поле. Предельная скорость метания рассчитывалась в предположении, что джоулев нагрев якоря и рельсов в процессе ускорения не приводит к их нагреву до температур, превышающих температуры плавления материалов, из которых они изготовлены. Показано, что, выбирая оптимальное положение витков, создающих дополнительное магнитное поле, относительно канала ускорителя, а также величину тока в них, можно значительно уменьшить тепловую нагрузку на рельсы и якорь в электромагнитных ускорителях твердых тел и существенно увеличить предельные кинематические характеристики этих ускорителей в бескризисных режимах работы.

Ключевые слова: рельсовые электромагнитные ускорители, внешнее магнитное поле, металлический якорь, численное моделирование, плотность тока, нагрев якоря.

Введение. Разрушение металлического якоря и канала рельсового ускорителя, вызванное значительными механическими электромагнитными и тепловыми нагрузками, возникающими в процессе ускорения, ограничивает скорость метания в рельсовых электромагнитных ускорителях с металлическим якорем.

Во многих случаях нагрев материалов якоря и (или) рельсов до температур, превышающих температуры их плавления, вызывает развитие различных кризисных процессов в ускорителе (в частности, нарушение контакта между якорем и рельсами и электродуговое замыкание тока), что приводит к уменьшению механической прочности материалов и снижению ускорения (вплоть до его прекращения) [1].

Одним из условий работы рельсового ускорителя в бескризисном режиме является отсутствие плавления материалов якоря и рельсов в течение всего процесса ускорения. В данной работе предполагается, что основным источником нагрева якоря и рельсов является джоулево тепло.

Для уменьшения тепловой нагрузки на рельсы и якорь необходимо уменьшить интенсивность тока. Одним из методов, позволяющих уменьшить ток через рельсы и якорь, не уменьшая электромагнитную силу, действующую на якорь, является использование внешнего магнитного поля, создаваемого токами в дополнительных витках, расположенных параллельно основному каналу ускорителя [2–6].

Сила, действующая на снаряд в рельсовом ускорителе с дополнительными витками, обычно рассчитывается с использованием соотношения [4–6]

$$F = \lambda I_r^2 / 2 + M' I_a I_r, \quad (1)$$

где λ — градиент индуктивности; M' — градиент взаимной индуктивности; I_r , I_a — токи в рельсовом ускорителе и дополнительных рельсах. Однако при использовании этого простого уравнения в общем случае не всегда можно корректно рассчитать магнитное давление на якорь в реальном ускорителе. Это обусловлено тем, что магнитные индуктивности внешних и внутреннего витков, а также их взаимная индуктивность изменяются по мере перемещения якоря [4], поэтому градиенты индуктивности λ и взаимной индуктивности M' изменяются в зависимости от пройденной якорем дистанции. Кроме того, в работе [7] показано, что градиент индуктивности зависит также от скорости движения якоря, пройденного им расстояния и формы импульсов тока.

В данной работе представлены результаты трехмерного нестационарного моделирования работы рельсовых ускорителей с учетом реальной конфигурации как дополнительных витков, создающих внешнее магнитное поле, так и рельсового ускорителя с токоподводящей цепью. Рассматривалось ускорение тел с С-образными якорями. Такая форма якоря обеспечивает в процессе ускорения надежный прижим контактирующих поверхностей, а также меньшую по сравнению с другими формами якорей скорость джоулева нагрева якоря вблизи контактных границ [7, 8].

Проведено исследование влияния положения внешних витков, создающих магнитное поле, на максимальную ускоряющую силу и минимальный нагрев якоря в процессе ускорения при прохождении им заданной дистанции.

Были выполнены расчеты предельной скорости снарядов различной массы с якорями, изготовленными из меди и алюминиевого сплава, на заданной дистанции ускорения. В качестве предельной скорости принималась максимальная скорость, до которой можно ускорить снаряд заданной массы на заданной дистанции ускорения при условии, что джоулев нагрев якоря и рельсов протекающими токами в процессе ускорения не приводит к их плавлению.

Анализ работы рельсовых ускорителей с дополнительными витками, создающими внешнее магнитное поле, при трехмерном моделировании с учетом движения и ускорения якоря, нестационарных распределений плотности тока и температуры в рельсах (в том числе дополнительных) и якоря ранее не проводился.

Целью настоящей работы является исследование особенностей джоулева нагрева якоря в рельсовых ускорителях с внешним полем, вычисление предельных по условиям нагрева скоростей снарядов на заданной дистанции ускорения, изучение влияния на эти скорости электротермических свойств материалов якоря, а также полной массы снаряда.

1. Постановка задачи. Используя обычные предположения, принимаемые при анализе сильноточных импульсных устройств (токи смещения не учитываются, магнитная проницаемость проводников считается равной магнитной проницаемости вакуума), из уравнений Максвелла получаем систему уравнений для векторного и скалярного потенциалов \mathbf{A} , φ , которую при дополнительном условии $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ в лабораторной системе координат для проводников (якорь и рельсы) можно записать в виде

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \frac{1}{\mu_0 \sigma} \nabla^2 \mathbf{A} - \mathbf{u} \times \nabla \times \mathbf{A} = -\nabla \varphi; \quad (2)$$

$$\mathbf{j} = -\nabla^2 \mathbf{A} = \sigma \left(-\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{u} \times \nabla \times \mathbf{A} \right); \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (4)$$

(\mathbf{u} — скорость движения якоря; σ — электропроводность). В окружающем проводники непроводящем пространстве, где плотность тока $\mathbf{j} = 0$, вместо уравнения (3) должно выполняться уравнение

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0. \quad (5)$$

Распределение температуры в якоре и рельсах определяется решением нестационарного уравнения теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + \frac{j^2}{\sigma}, \quad (6)$$

где ρ — плотность; c — теплоемкость; k — теплопроводность материала.

Электромагнитная часть задачи фактически содержит одно граничное условие: на бесконечно удаленной границе компоненты векторного потенциала должны обращаться в нуль. На границах между проводниками, а также между проводниками и окружающим непроводящим пространством выполняются условия непрерывности компонент векторного потенциала и их производных.

Граничным условием для уравнения теплопроводности (6) является отсутствие теплообмена с окружающей средой в процессе ускорения (условие Неймана на внешних границах проводников). На контактной границе ставится условие непрерывности температуры и нормальной компоненты теплового потока (идеальный тепловой контакт).

Скорость снаряда V и пройденное им расстояние L рассчитываются путем интегрирования уравнений движения:

$$M \frac{dV}{dt} = \int_{\Omega_a} [\mathbf{j} \times \nabla \times \mathbf{A}]_x d\Omega, \quad \frac{dL}{dt} = V \quad (7)$$

(M — полная масса ускоряемого снаряда; Ω_a — область, занимаемая якорем).

2. Методика численного решения. Вследствие симметрии электромагнитного ускорителя задачу можно свести к исследованию электромагнитных и тепловых процессов, происходящих в 1/4 объема якоря и рельсов. Используемые в расчетах конфигурации ускорителей представлены на рис. 1.

Аппроксимация уравнений (2), (4), (6) в области, занимаемой проводниками, проводилась с использованием конечно-элементного метода взвешенных невязок в формулировке Галеркина, вне этой области применялся метод граничных элементов [8]. Расчетная область в проводниках представлялась в виде неоднородной сетки, состоящей из шестигранных элементов. Для аппроксимации потенциалов использовались линейные базисные функции. Более детально методика расчетов полей в рельсовом ускорителе при постоянной скорости движения якоря изложена в [8]. В данной работе для аппроксимации уравнений (2), (4), (6) использовалась неравномерно движущаяся сетка. Предполагалось, что в области якоря и на некоторых расстояниях перед ним и за ним сетка движется равномерно со скоростью, равной скорости якоря. В областях перед якорем и за ним в процессе вычислений сетка сжималась и растягивалась в соответствии с перемещением якоря. В точках сетки, движущихся со скоростью \mathbf{v} , для вычисления скорости изменения потенциалов и температуры в уравнениях (2), (3), (6) использовались выражения

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \frac{d\mathbf{A}}{dt} - (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{A}, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{dT}{dt} - (\mathbf{v} \cdot \nabla) T.$$

Для преодоления вычислительных трудностей, возникающих вследствие чрезмерного сжатия и растяжения элементов сетки, в ходе вычислений периодически проводилась перестройка сетки (удаление элементов сетки перед якорем и добавление за ним).

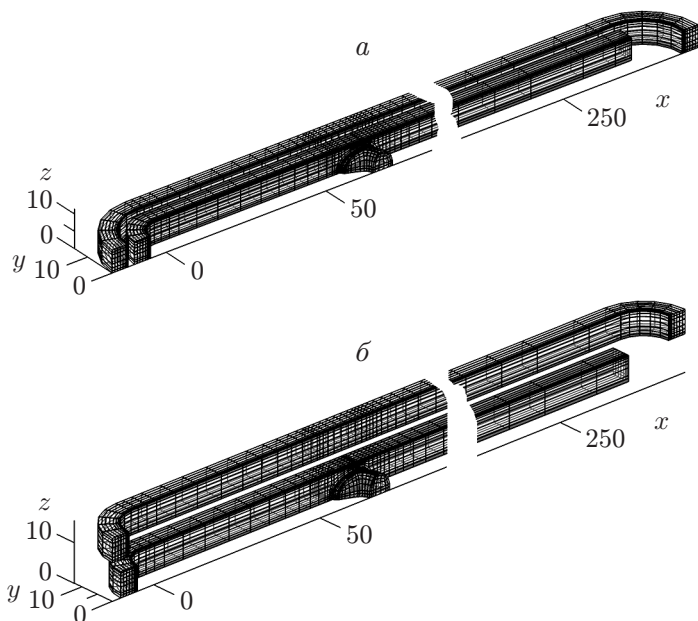


Рис. 1

Рис. 1. Конфигурации ускорителей:

a — ускоритель с одним внешним витком, *б* — ускоритель с двумя внешними витками

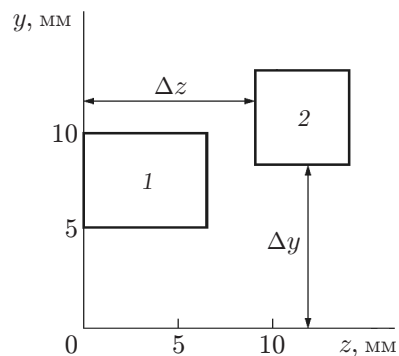


Рис. 2

Рис. 2. Сечение проводников для ускорителя с внешними витками:

1 — рельс, 2 — дополнительный виток

В используемой постановке для получения решения поставленной задачи необходимы значительные вычислительные затраты для пересчета всех матриц (жесткости, масс и переноса) на каждом шаге по времени в соответствии с изменением положения якоря и его скорости. Поэтому в данной работе рассматривается малоразмерный рельсовый ускоритель, в котором размеры сечения канала составляли 10×10 мм, длина канала — 270 мм, размеры сечения рельсов — 13×5 мм, размеры сечения проводников одиночного внешнего витка — 13×5 мм, размеры сечения проводников для ускорителей с двумя внешними витками — 5×5 мм (рис. 2).

Зависимости полных токов в рельсах $I_r(t)$ и внешних витках $I_a(t)$ полагались заданными и вычислялись по формуле

$$I_r(t) = I_r(1 - e^{-t/t_0}) \quad (8)$$

($t_0 = 30$ мкс) при некотором заданном отношении $I_a(t)/I_r(t) = k$. Электрические напряжения на входе рельсового ускорителя и в дополнительных витках для каждого момента времени рассчитывались на основе зависимости (8).

3. Результаты расчетов. С использованием описанной выше методики проведены расчеты нагрева якоря в зависимости от дистанции ускорения для различных конфигураций ускорителя. На рис. 3 представлены расчетные зависимости изменения максимальной температуры медного якоря вблизи контактной границы рельс — якорь от пройденного расстояния в ускорителях с одним и двумя дополнительными витками. В расчетах не учитывались плавление и испарение материалов и считалось, что $V_0 = 50$ м/с, $M = 5$ г, $I_a/I_r = 0,5$, $I_r = 200$ кА. Более подробные данные о параметрах ускорителей, использованных в расчетах, и достигнутые к моменту начала плавления якоря значения скорости приведены в табл. 1 (Δz — половина расстояния между витками; Δy — расстояние от

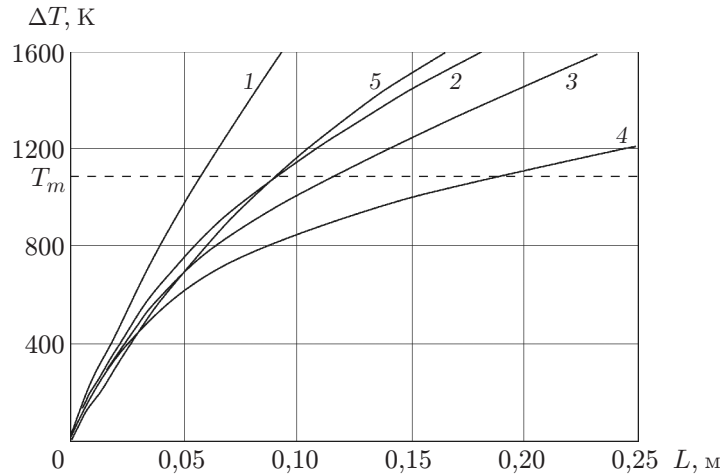


Рис. 3. Зависимость изменения температуры от дистанции ускорения:
1–5 — зависимости, полученные при различных значениях параметров ускорителей
(см. табл. 1)

Таблица 1

Параметры ускорителей ($\bar{\lambda} = 0,47$ мкН/м)

Номер кривой на рис. 3	Количество витков	Δz , мм	Δy , мм	\bar{M}' , мкН/м	L , мм	V_{\max} , м/с
1	1	0	13,0	0,26	59	503
2	2	9,5	11,5	0,16	87	580
3	2	9,5	7,5	0,14	121	720
4	2	9,5	5,0	0,13	183	840
5	0	—	—	—	87	510

внутренней плоскости витка до плоскости $y = 0$; \bar{M}' — среднее значение градиента взаимной индуктивности; L — расстояние, пройденное якорем; V_{\max} — максимальная скорость, достигнутая якорем в момент его нагрева до температуры плавления; $\bar{\lambda}$ — среднее значение градиента индуктивности, полученное при расчете рельсового ускорителя без дополнительных витков).

С помощью рельсового ускорителя с одним внешним витком достигается максимальная сила, действующая на якорь (см. (1)), однако при этом нагрев якоря происходит быстрее, чем при использовании ускорителя с двумя дополнительными витками. Относительное увеличение скорости в ускорителе с одним дополнительным витком незначительно, а температура плавления якоря достигается существенно быстрее по сравнению со случаем использования ускорителя с двумя витками (см. рис. 3). Это обусловлено тем, что в ускорителе с одним витком создаваемое внешним витком магнитное поле порождает значительные вихревые токи в рельсах перед якорем, вызывающие их дополнительный нагрев, в результате чего существенно снижается эффективность отвода тепла из якоря в рельсы и происходит более быстрый его нагрев. Такой же эффект наблюдается в рельсовом ускорителе с двумя дополнительными витками, в случае если значение Δy больше половины расстояния между рельсами.

Результаты расчетов изменения максимальной температуры якоря, его скорости, среднего градиента индуктивности и среднего градиента взаимной индуктивности при $V_0 = 50$ м/с, $L = 150$ мм, $M = 5$ г, $I_r = 200$ кА для рельсового ускорителя с двумя до-

Таблица 2

Результаты расчетов характеристик рельсового ускорителя
с двумя дополнительными витками

I_a/I_r	$\bar{\lambda}$, мкН/м	\bar{M}' , мкН/м	ΔT , К	V , м/с
0,50	0,47	0,130	1000	835
0,75	0,47	0,140	942	878
1,00	0,47	0,145	969	927

Таблица 3

Предельные скорости снарядов в ускорителях ($L = 250$ мм)

Материал якоря	Количество витков	Δy , мм	M , г	I_r , кА	I_a/I_r	V , м/с	ΔV , %
Cu	0	—	5	150	0	700	0
Cu	1	13,0	5	127	0,50	735	5
Cu	2	11,5	5	152	0,50	832	19
Cu	2	7,5	5	163	0,50	878	25
Cu	2	5,0	5	184	0,50	992	42
Cu	2	5,0	5	191	0,75	1087	55
Cu	2	5,0	5	189	1,00	1136	62
Cu	0	—	10	158	0	526	0
Cu	2	5,0	10	195	0,75	792	50
Cu	2	5,0	10	193	1,00	825	57
Al	0	5,0	10	133	0	443	0
Al	2	5,0	10	158	1,00	672	52
Al	2	5,0	10	159	1,50	738	67
Al	2	5,0	10	158	2,00	794	79
Al	2	5,0	10	157	2,50	842	90
Al	2	5,0	10	154	3,00	875	98

полнительными витками, расположенными на одном уровне с рельсами, представлены в табл. 2. Предполагалось, что рельсы и якорь изготовлены из меди.

Следует отметить, что при увеличении токов во внешних витках осредненный градиент взаимной индуктивности незначительно увеличивается. Поскольку значение градиента взаимной индуктивности небольшое, увеличение отношения I_a/I_r оказывает незначительное влияние на скорость снаряда при прохождении им заданной дистанции. В этом случае нагрев якоря слабо зависит от отношения I_a/I_r (см. табл. 2).

Проведены также расчеты предельных по условиям нагрева скоростей в рельсовых ускорителях с одним и двумя дополнительными витками для якорей, изготовленных из меди (Cu) и алюминия (Al), при полных ускоряемых массах снарядов 5 и 10 г и дистанции ускорения 250 мм при различных значениях Δy . При этом величина полного тока в рельсовом ускорителе выбиралась в предположении, что максимальная температура в якоре достигала значения, равного температуре плавления его материала, в конце процесса ускорения. Результаты расчетов представлены в табл. 3. В последней графе приведены значения относительного увеличения предельной по условиям нагрева скорости снарядов ΔV в ускорителях с внешним магнитным полем по сравнению с предельной скоростью снарядов в ускорителях без внешнего поля. Из табл. 3 следует, что использование внешних магнитных полей позволяет увеличить предельную скорость снарядов с медным якорем более чем на 60 %, а снарядов с якорями из алюминия — почти на 100 %.

Заключение. Проведенный анализ показал, что положение дополнительных витков относительно основного канала ускорителя, а также электротермические свойства материала якоря оказывают существенное влияние на плотность тока на контактной границе рельс — якорь и предельные по условиям нагрева скорости метания тел в рельсовых электромагнитных ускорителях с внешним магнитным полем.

Использование одного дополнительного витка, расположенного непосредственно над рельсами, обеспечивает, с одной стороны, максимальный градиент взаимной индуктивности и максимальное увеличение ускоряющей снаряд силы, а с другой — дополнительный нагрев рельсов и дополнительное увеличение плотности тока на контактной границе рельс — якорь за счет возникновения вихревых токов в рельсах перед якорем.

Результаты расчетов показали, что более предпочтительной конфигурацией является рельсовый ускоритель с двумя дополнительными витками, расположенными параллельно рельсам. В этом случае можно обеспечить максимальное увеличение скорости тел на заданной дистанции ускорения.

Максимальное увеличение предельной скорости достигается для якорей, изготовленных из материалов, электропроводность которых меньше, чем у якорей из меди, а также при увеличении отношения I_a/I_r . Однако возможность увеличения этого отношения ограничена механической прочностью и допустимой максимальной тепловой нагрузкой ствола ускорителя и дополнительных витков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barber J. P., Bauer D. P., Jamison K., et al. A survey of armature transition mechanisms // IEEE Trans. Magn. 2003. V. 39, N 1. P. 47–51.
2. Агарков В. Ф., Бондалетов В. Н., Калихман С. А., Пичугин Ю. П. Ускорение проводников до гиперзвуковых скоростей в импульсном магнитном поле // ПМТФ. 1974. № 3. С. 44–53.
3. Коровин Н. С., Учватов А. Н., Шурупов А. В. Динамические процессы в магнитоплазменном ускорителе с внешним магнитным полем // Материалы 2-го Всесоюз. семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле, Новосибирск, 4–6 дек. 1991 г. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1992. С. 193–202.
4. Tailor J., Keefer D. Calculations of electromagnetic forces in railguns // IEEE Trans. Magn. 1991. V. 27, N 1. P. 176–180.
5. Gallant J. Parametric study of the augmented railgun // IEEE Trans. Magn. 2003. V. 39, N 1. P. 451–455.
6. Gallant J., Lehmann P. Experiments with brush projectiles in parallel augmented railgun // IEEE Trans. Magn. 2005. V. 40, N 1. P. 188–193.
7. Shvetsov G. A., Stankevich S. V. Comparison between 2D and 3D electromagnetic modeling of railgun // IEEE Trans. Magn. 2009. V. 45, N 1. P. 453–457.
8. Станкевич С. В., Швецов Г. А. Влияние формы металлических твердых тел на скорость их джоулева нагрева в рельсовых электромагнитных ускорителях // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 2. С. 205–216.

Поступила в редакцию 26/VIII 2013 г.