

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  $\lambda$  — 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  $\lambda$  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  $\mathbf{A}$ ,  $\varphi$ , 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;  $\sigma$  — 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  $\rho$  — 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;  $\Omega_a$  — 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).

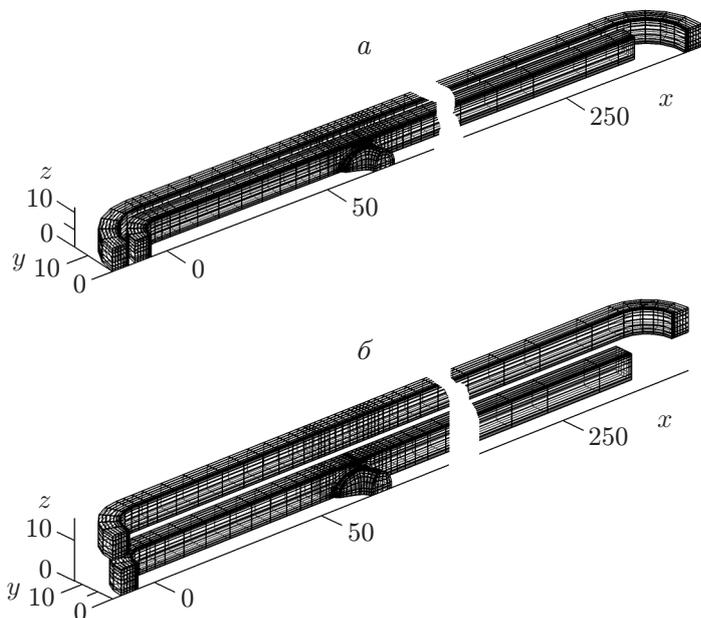


Рис. 1

Рис. 1. Конфигурации ускорителей:

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

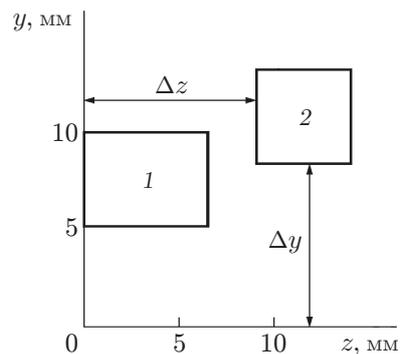


Рис. 2

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  $10 \times 10$  мм, длина канала — 270 мм, размеры сечения рельсов —  $13 \times 5$  мм, размеры сечения проводников одиночного внешнего витка —  $13 \times 5$  мм, размеры сечения проводников для ускорителей с двумя внешними витками —  $5 \times 5$  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 ( $\Delta z$  — половина расстояния между витками;  $\Delta y$  — расстояние от

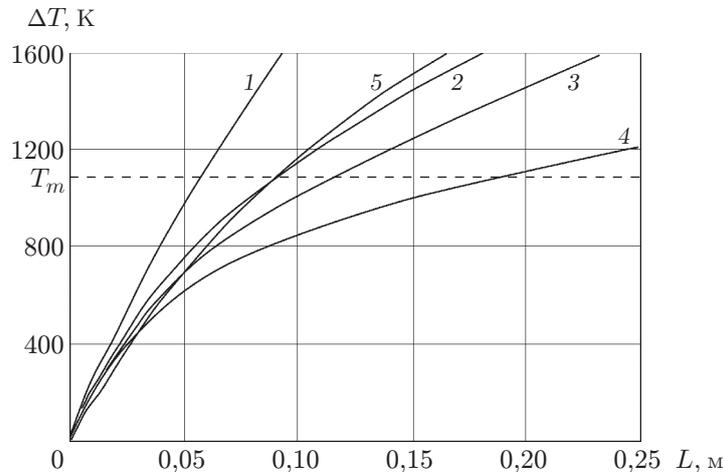


Рис. 3. Зависимость изменения температуры от дистанции ускорения:  
1–5 — зависимости, полученные при различных значениях параметров ускорителей  
(см. табл. 1)

Таблица 1

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

Номер кривой на рис. 3	Количество витков	$\Delta z$ , мм	$\Delta y$ , 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  $\Delta y$  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	$\Delta T$ , 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	$\Delta y$ , мм	$M$ , г	$I_r$ , кА	$I_a/I_r$	$V$ , м/с	$\Delta V$ , %
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  $\Delta y$ . 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  $\Delta V$  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.*