

УДК 621.362:537.84

ТЕПЛОВЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТРЕЛЬНОМ МНОГОРЕЛЬСОВОМ УСКОРИТЕЛЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ЗАПИТЫВАЕМОМ ОТ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

С. В. Станкевич^{*,**}, Г. А. Швецов^{*,**}, В. Г. Бутов^{***}, С. В. Синяев^{***}

* Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

** Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск, Россия

*** Институт прикладной математики и механики Национального исследовательского

Томского государственного университета, 634050 Томск, Россия

E-mails: stankevichsv@mail.ru, shvetsov@hydro.nsc.ru, bvg@niipmm.tsu.ru, ssv@niipmm.tsu.ru

На основе численного моделирования, выполненного с использованием двумерной и трехмерной нестационарных постановок, проведен анализ работы многорельсовых электромагнитных ускорителей твердых тел при последовательном ускорении в них нескольких тел с высокой скоростью стрельбы. В расчетах в качестве источника питания ускорителей принимается импульсный магнитогидродинамический генератор типа генератора “Сахалин”. Рассмотрены ускорители с тремя и пятью парами параллельно расположенных рельсов, соединенных в последовательную электрическую цепь. Проведено моделирование ускорения различного количества тел в очереди, имеющих различную массу. Установлено, что одним из основных ограничений работы ускорителей при таких режимах является нагрев рельсов. Показано, что скорость нагрева рельсов определяется неоднородностью распределения плотности тока по сечению рельсов, обусловленной нестационарной диффузией магнитного поля в рельсы. В результате расчетов с учетом нестационарного характера распределения плотности токов в рельсах многорельсового ускорителя установлено, что при соответствующем выборе массы ускоряемых тел (до 800 г), их количества в очереди и материала рельсов возможно достижение скоростей метания $1,8 \div 2,5$ км/с при умеренном нагреве рельсов.

Ключевые слова: многорельсовый электромагнитный ускоритель, нагрев рельсов, численное моделирование, импульсный магнитогидродинамический генератор.

DOI: 10.15372/PMTF20170513

Введение. Для достижения скоростей метания более $2 \div 3$ км/с в электромагнитных рельсовых ускорителях с высокой скоростью последовательного метания твердых тел даже для тел с относительно небольшими массами ($100 \div 1000$ г) необходимо использовать источники питания с запасом энергии порядка 10 и 100 МДж [1, 2]. Поскольку конденсаторные батареи имеют большие массу и размеры, создание на их основе мобильных источников невозможно. Альтернативными источниками энергии являются импульсные магнитогидродинамические (МГД) генераторы на ракетном топливе [3–5]. Эти генераторы компактны, автономны и имеют удельные энергетические характеристики, во

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания (проект № 9.9752.2017/8.9).

© Станкевич С. В., Швецов Г. А., Бутов В. Г., Синяев С. В., 2017

много раз превышающие удельные энергетические характеристики конденсаторов. Анализ работы импульсного МГД-генератора (ИМГДГ) на многорельсовый электромагнитный ускоритель твердых тел показал перспективность использования мощных ИМГДГ в качестве источника питания импульсных высокоскорострельных ускорителей твердых тел [6, 7]. Однако возникает вопрос, насколько существенны в таких ускорителях тепловые ограничения скорости, обусловленные нагревом рельсов при последовательном ускорении нескольких тел. В работе [7] нагрев рельсов рассчитывался на основе предположения о равномерном распределении плотности тока по сечению рельсов. Очевидно, что такое приближение является некорректным, так как распределение плотности тока существенно нестационарное и в процессе ускорения тел изменяется как по сечению рельсов, так и по длине ускорителя.

В данной работе на основе численного моделирования, выполненного с использованием двумерной и трехмерной нестационарных постановок, проведен анализ тепловых ограничений в многорельсовых электромагнитных ускорителях твердых тел при последовательном ускорении в них нескольких тел в случае высокой скорости метания. Существенной особенностью нагрева рельсов является неоднородность распределения плотности тока по сечению рельсов, обусловленная нестационарной диффузией магнитного поля в рельсы и скоростным скин-эффектом [8]. Целью данной работы является исследование нагрева рельсов в высокоскорострельном многорельсовом электромагнитном ускорителе, запитываемом от ИМГДГ.

1. Постановка задачи. При исследовании нестационарных магнитных полей, плотностей токов и температур в многорельсовом электромагнитном ускорителе (МРЭУ) в течение всего процесса ускорения требуется проведение расчетов в нестационарной трехмерной постановке с использованием мелких сеток, что существенно усложняет вычисления и увеличивает время вычислений. Однако задачу можно упростить, если учитывать, что распределение магнитных полей и плотностей токов имеет трехмерный характер только вблизи ускоряемого проводящего якоря; распределение магнитных полей и плотностей токов в окрестности якоря даже при умеренных скоростях движения ускоряемой сборки ($50 \div 100$ м/с) является практически стационарным; распределения магнитных полей и плотностей токов на расстоянии от ускоряемого снаряда, превышающем $2 \div 3$ калибра, слабо зависят от пространственной координаты, направление которой совпадает с направлением движения якоря.

Нестационарные распределения магнитных полей, плотностей токов и напряжений в рельсах и канале МРЭУ определялись на основе численного решения двумерных нестационарных уравнений Максвелла в квазистатическом приближении и уравнения теплопроводности. Рельсы ускорителя разбивались на N фрагментов, которые последовательно (по мере движения ускоряемого тела) включались в расчет. Электромагнитная сила, действующая на ускоряемое тело, вычислялась на основе численного решения стационарных трехмерных задач о распределении магнитных полей и плотностей токов в движущемся якоре и рельсах. Расчетные области показаны на рис. 1.

1.1. Трехмерные расчеты распределений магнитного потенциала и плотности тока в якоре и рельсах. Пренебрегая токами смещения, полагая магнитную проницаемость среды равной магнитной проницаемости вакуума μ_0 и принимая $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, а также используя калибровочное условие $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, из системы уравнений Максвелла получаем уравнения для векторного \mathbf{A} и скалярного φ потенциалов, которые в системе отсчета, движущейся вместе с ускоряемым снарядом, для проводников (якорей и рельсов) имеют вид

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

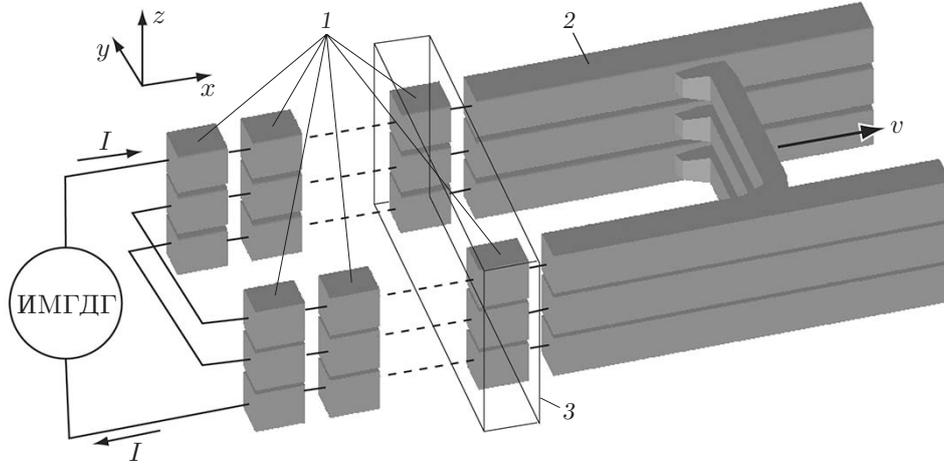


Рис. 1. Расчетные области для МРЭУ с тремя парами рельсов: 1 — область, в которой решается двумерная задача, 2 — область, в которой решается трехмерная задача, 3 — n -й фрагмент

$$\mathbf{j} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = \nabla \cdot (\sigma(-\nabla\varphi + \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A})) = 0 \quad (3)$$

(σ — электропроводность; \mathbf{v} — скорость якоря; \mathbf{j} — плотность тока).

В окружающем непроводящем пространстве, где плотность тока $\mathbf{j} = 0$, уравнение (2) заменяется уравнением

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0. \quad (4)$$

Следует отметить, что в принятой постановке распределение потенциалов в проводниках зависит только от скорости снаряда, полной силы тока и электропроводности рельсов и якоря.

Распределение температуры в области 2 (см. рис. 1) определялось на основе решения нестационарного уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)(\rho c T) - \nabla \cdot k \nabla T = \frac{\mathbf{j}^2}{\sigma}, \quad (5)$$

где ρ , c , k — плотность, теплоемкость и теплопроводность материала соответственно. Заметим, что для корректного расчета температуры нагрева рельсов в окрестностях контактных границ рельсы — якорь необходимо учитывать перенос тепла за счет теплопроводности (третье слагаемое в левой части (5)). Пренебрежение этим процессом приводит к существенному завышению расчетных значений скорости нагрева в областях концентрации тока вследствие наличия скоростного скин-эффекта.

1.2. *Двумерные расчеты нестационарных распределений магнитного потенциала и плотности тока в канале МРЭУ.* Распределения магнитных полей, плотностей токов и температуры в канале ускорителя вдали от ускоряемого якоря слабо зависят от координаты x , направление которой совпадает с направлением ускорения. Таким образом, канал ускорителя можно представить в виде набора фрагментов (см. рис. 1), в каждом из которых нестационарные распределения магнитных полей и плотностей токов не зависят от x и могут быть найдены на основе численного решения уравнений Максвелла в квазистатическом приближении в двумерной постановке. При смещении ускоряемого тела и соответственно перемещении трехмерной расчетной области относительно рельсов

количество фрагментов рельсов, включаемых в расчет $n(t)$, увеличивалось. Для каждого нового фрагмента, включаемого в расчет, предполагалось, что начальные распределения векторного потенциала и плотности тока в нем совпадают с соответствующими распределениями этих величин, рассчитанными для трехмерной области. Начальная температура в этом фрагменте задавалась в виде суммы температур, рассчитанных для предыдущего выстрела, и температур на тыльных границах рельсов, рассчитанных для трехмерной области.

Для нахождения нестационарных распределений векторного потенциала, плотности тока и температуры в каждом i -м фрагменте для каждой j -й пары рельсов решались уравнения

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{i,j}}{\partial t} - \frac{1}{\mu_0 \sigma} \Delta A_{i,j} &= U_{i,j} \quad (i = 1, \dots, n(t), \quad j = 1, \dots, N_r), \\ j_{i,j} &= -\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 A_{i,j}, \\ \frac{\partial (\rho c T_{i,j})}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T_{i,j} &= \frac{j_{i,j}^2}{\sigma}, \\ I_{i,j} &= \int_{S_{i,j}} j_{i,j} dS, \end{aligned} \quad (6)$$

где N_r — число пар рельсов; $U_{i,j}$, $I_{i,j}$, $S_{i,j}$ — падение напряжения на единицу длины, полная сила тока и площадь поперечного сечения соответственно для i -го фрагмента и j -й пары рельсов. Для нахождения напряжений $U_{i,j}$ использовалось равенство силы тока во фрагментах рельсов полной силе тока в МРЭУ: $I_{i,j} = I(t)$.

2. Методика численного решения. В силу симметрии задачи расчеты проводились в 1/4 области, представленной на рис. 1. Аппроксимация уравнений (1)–(3), (5) и системы уравнений (6) в области проводников проводилась с использованием метода конечных элементов. Для решения уравнения (4) применялся метод граничных элементов. Более детально методика численного моделирования описана в работе [9].

На первом этапе для определенного набора значений скорости якоря v_k ($k = 1, \dots, m$) и заданной величины полной силы тока $I_0 = 1$ в каждом рельсе МРЭУ решались уравнения (1)–(4) и рассчитывались распределения векторного потенциала $\mathbf{A}(\mathbf{r}, v_k)$, плотности тока в якоре и рельсах $\mathbf{j}(\mathbf{r}, v_k)$, индукции магнитного поля $\mathbf{B}(\mathbf{r}, v_k)$ и ускоряющей магнитной силы $F(v_k)$, действующей на якоря в направлении их движения:

$$F(v_k) = \int_{V_a} [\mathbf{j}(\mathbf{r}, v_k) \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, v_k)]_x dV \quad (7)$$

(интегрирование проводится только по объему якорей V_a).

С учетом использованного в трехмерных расчетах условия $I_0 = 1$ эффективная погонная индуктивность МРЭУ определяется соотношением

$$\lambda_{3D}(v_k) = 2F(v_k) \quad (8)$$

(индекс “3D” соответствует значениям величин, для которых проводится трехмерный расчет).

Полное электрическое сопротивление якоря $R_{3D}(v_k)$ вычислялось с использованием условия равенства джоулевых потерь, полученных в трехмерных расчетах, джоулевым потерям в эквивалентной электротехнической цепи с сосредоточенными параметрами:

$$R_{3D}(v_k) = \int_{V_{3D}} \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}, v_i)^2}{\sigma(\mathbf{r})} dV. \quad (9)$$

Здесь V_{3D} — полный объем проводников (рельсов и якорей) в трехмерной области. Индуктивность $L_{3D}(v_i)$ определялась из условия равенства магнитной энергии $E_{m3D} = L_{3D}(v_k)I^2/2$ и магнитной энергии, рассчитанной для трехмерной области:

$$L_{3D}(v_i) = 2E_{m3D} = \int_{V_{3D}} \mathbf{A}(\mathbf{r}, v_i) \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}, v_i) dV. \quad (10)$$

Полное падение напряжения находилось с использованием соотношения

$$U_{3D}(v) = \frac{d(L_{3D}(v)I)}{dt} + R_{3D}(v)I,$$

где величины $L_{3D}(v)$, $R_{3D}(v)$ вычислялись на основе сплайн-интерполяции дискретного множества значений этих величин (9), (10), полученных в трехмерных расчетах.

Полная сила тока в МРЭУ определялась из решения дополнительного уравнения

$$L_{add}\dot{I} + R_{add}I + U_{3D}(v) + \sum_{i=1}^{n(t)} l_i \sum_{j=1}^{N_R} U_{i,j} + \lambda_{3D}(v)vI = U_G(I),$$

где L_{add} , R_{add} — индуктивность и сопротивление соединительных электрических цепей между генератором и рельсовым ускорителем; l_i — длина i -го фрагмента; $U_G(I)$ — напряжение, создаваемое ИМГДГ при полной силе тока через него I .

Скорость снаряда v , а также пройденное им расстояние D определялись на основе решения уравнений движения

$$M \frac{dv}{dt} = \frac{\lambda_{3D}(v)}{2} I^2, \quad \frac{dD}{dt} = v, \quad v(0) = v_0, \quad D(0) = D_0,$$

где погонная индуктивность $\lambda_{3D}(v)$ вычислялась на основе интерполяции значений $\lambda_{3D}(v_k)$, полученных в трехмерных расчетах (см. (7), (8)); M — полная масса ускоряемого тела.

В расчетах полагалось, что до первого выстрела начальная температура рельсов равна 20 °С. При расчетах первого и последующих выстрелов считалось, что начальная плотность тока во всех расчетных областях равна нулю, т. е. полный ток в МРЭУ полностью исчезает при выходе предыдущего снаряда из ствола вследствие наличия на выходе из ствола дополнительных перемычек с большим электрическим сопротивлением. Начальная температура в двумерных фрагментах равна температуре, полученной при расчете предыдущего выстрела. В трехмерных расчетах пренебрегалось нагревом якорей и полагалось, что в течение всего процесса ускорения между якорями и рельсами сохраняется идеальный металлический контакт. В двумерных расчетах учитывалось изменение электротермических свойств материалов в зависимости от температуры [10].

3. Результаты расчетов. Расчеты проводились для многорельсовых электромагнитных ускорителей с тремя и пятью парами рельсов. В качестве источника питания МРЭУ рассматривались один или два соединенных параллельно ИМГДГ типа генератора “Сахалин”. Вольт-амперная характеристика генераторов такого типа достаточно точно описывается уравнением [7]

$$U_G(I) = U_{\max} - (U_{\max} - U_{cr})I/I_{\max},$$

где U_{\max} — максимальное напряжение генератора при холостом ходе; U_{cr} — минимальное (критическое) напряжение, при котором сохраняется устойчивая работа генератора; I_{\max} — максимальная сила тока генератора. Для генератора типа генератора “Сахалин” $U_{\max} = 5$ кВ, $U_{cr} = 1$ кВ, $I_{\max} = 250$ кА. Для двух параллельно включенных генераторов $I_{\max} = 500$ кА.

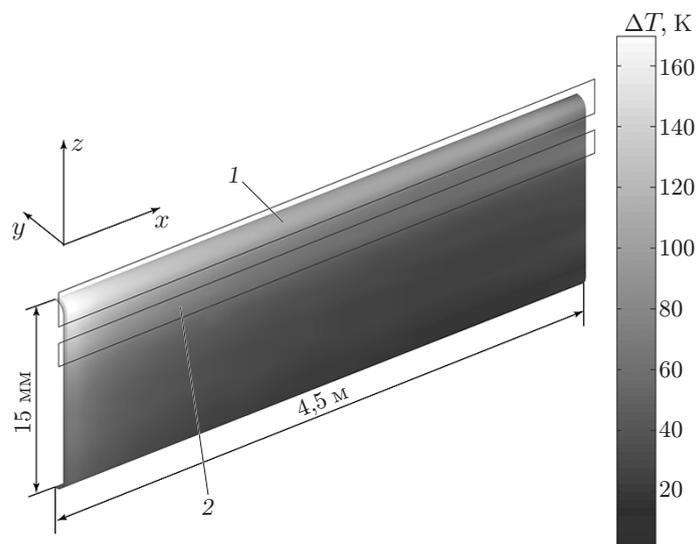


Рис. 2. Увеличение температуры на внутренней поверхности внешнего рельса для МРЭУ с тремя парами рельсов после вылета из ствола первого тела: 1 — область, в которой нагрев обусловлен концентрацией плотности тока, 2 — область, в которой нагрев обусловлен наличием скоростного скин-эффекта

Рассматривались ускорители с рельсами шириной 12 и 15 мм, изготовленными из различных материалов (сталь, медный сплав), а также якоря из меди и алюминиевого сплава. Для упрощения расчетов (за счет уменьшения количества расчетных точек) высота рельсов принималась равной 1 см. Ширина всех рельсов в МРЭУ считалась одинаковой. Максимальная ширина контактной зоны рельс — якорь в направлении, перпендикулярном направлению движения якоря, принималась равной 1 см.

В ходе вычислений установлено, что для МРЭУ как с тремя, так и с пятью парами рельсов имеется две области с максимальным увеличением температуры в рельсах по сравнению с начальной температурой (рис. 2). Нагрев в области 1 обусловлен концентрацией плотности тока, в области 2 — наличием скоростного скин-эффекта. На рис. 2 показано увеличение температуры на внутренней поверхности внешнего рельса для МРЭУ с тремя парами рельсов после вылета из ствола первого тела. Если ширина рельсов равна ширине якоря или незначительно отличается от нее, то в области 1 происходит сложение плотностей токов, что приводит к более быстрому увеличению температуры в ней.

На рис. 3 представлены распределения температуры рельсов шириной 12 и 15 мм вдоль канала МРЭУ после вылета первого снаряда в случае использования одного ИМГДГ. Начальная скорость снаряда 50 м/с, масса тела — 100 г. Такие же распределения температуры рельсов вдоль канала ускорителя для рельсов шириной 12 и 15 мм получены для других комбинаций материалов рельсов и якорей (Cu/Cu, Cu/Al, Fe/Cu, Fe/Al). Ниже приводятся результаты расчетов при ширине рельсов, равной 15 мм. Размер сечения канала для ускорителя с тремя парами рельсов составлял 42×42 мм, для ускорителя с пятью парами рельсов — 75×75 мм.

Расчеты нагрева рельсов при различных скоростях входа снарядов в канал ускорителя ($v_0 = 50, 100, 200$ м/с) показали, что для всех исследованных комбинаций материалов рельсов и якорей и при различном количестве пар рельсов температура рельсов слабо зависит от начальной скорости снарядов. Увеличение начальной скорости снарядов приводит к уменьшению максимальной силы тока и максимальной температуры на начальном участке канала ускорителя приблизительно на 3–5 %. Однако, например, при общем времени уско-

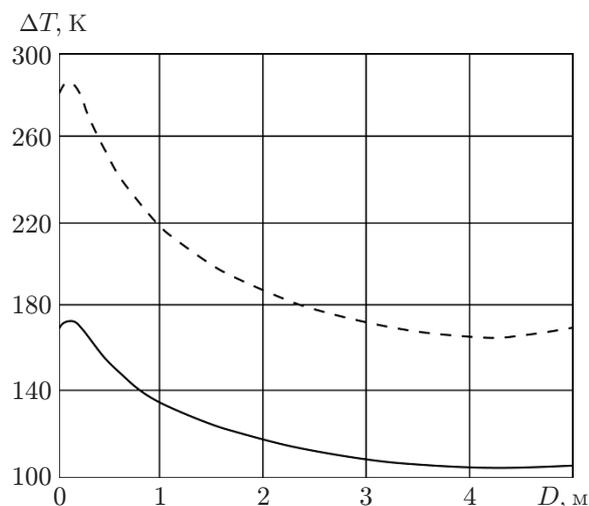


Рис. 3

Рис. 3. Максимальное увеличение температуры рельсов шириной 12 мм (штриховая кривая) и 15 мм (сплошная кривая) вдоль канала МРЭУ с тремя парами рельсов после одиночного выстрела

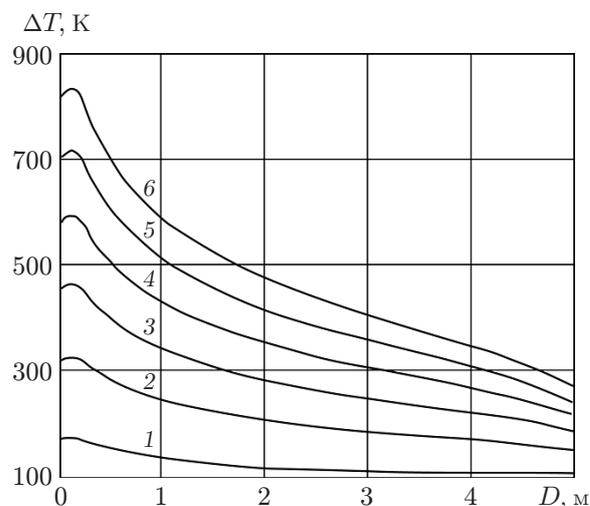


Рис. 4

Рис. 4. Максимальное увеличение температуры рельсов вдоль канала МРЭУ с тремя парами рельсов в серии из шести выстрелов:

1-6 — выстрелы 1-6

рения 3 мс для обеспечения выхода предыдущего снаряда из ствола ускорителя до момента входа в канал следующего снаряда расстояние между последовательно подаваемыми снарядами должно быть равно 15, 30, 60 см при $v_0 = 50, 100, 200$ м/с соответственно. Таким образом, при начальных скоростях $v_0 = 100, 200$ м/с представляется затруднительным обеспечить последовательную подачу снарядов в канал МРЭУ из разогнанной жесткой сборки даже в случае 3-5 снарядов. Далее в расчетах полагаем $v_0 = 50$ м/с.

На рис. 4 показано максимальное увеличение температуры вдоль канала МРЭУ с тремя парами рельсов при последовательном ускорении шести снарядов, масса каждого из которых равна 100 г. Результаты получены в случае использования одного ИМГДГ. Время ускорения составляло приблизительно 4 мс. Максимальная сила тока $I_{\max} \approx 245$ кА, конечная скорость $v = 2,7$ км/с. На рис. 4 видно, что максимальное увеличение температуры рельсов при каждом последующем выстреле меньше увеличения температуры при первом выстреле. Это объясняется уменьшением электропроводности материала рельсов с ростом температуры и как следствие уменьшением плотности тока в нагретых областях рельсов.

На рис. 5 показано распределение температуры в $1/4$ сечения канала для двумерного фрагмента, в котором достигается максимальное увеличение температуры после шести выстрелов. Максимальное увеличение температуры достигается в области 1 (см. рис. 2), при этом глубина области существенного нагрева не превышает $1,5 \div 2,0$ мм. Увеличение температуры в центральных областях рельсов не превышает $200 \div 300$ К.

На рис. 6 представлены результаты расчета увеличения температуры вдоль канала МРЭУ после шести выстрелов, полученные при тех же параметрах МРЭУ для очереди из снарядов массой $M = 100, 200, 300$ г. Видно, что увеличение температуры рельсов слабо зависит от массы ускоряемых тел, однако конечные скорости снарядов при длине ускорителя, равной 5 м, существенно различаются: $v = 2,7; 2,2; 1,8$ км/с при $M = 100, 200,$

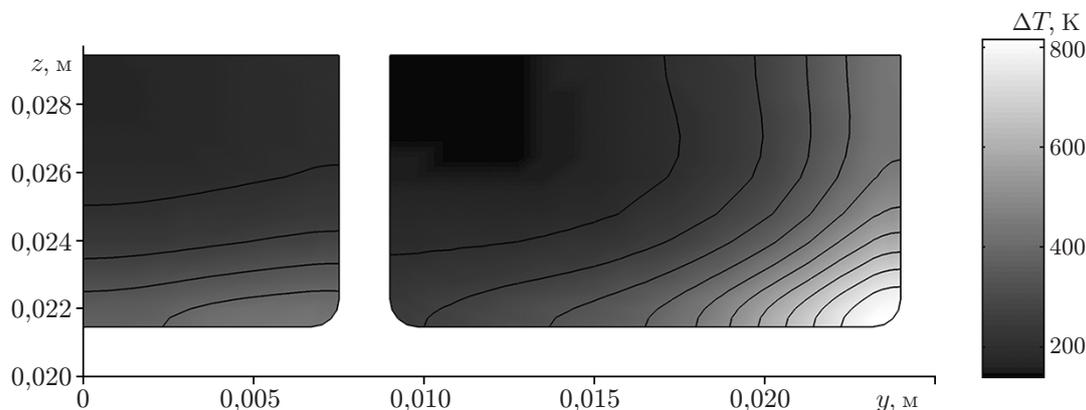


Рис. 5. Распределение увеличения температуры по сечению рельсов после шести выстрелов

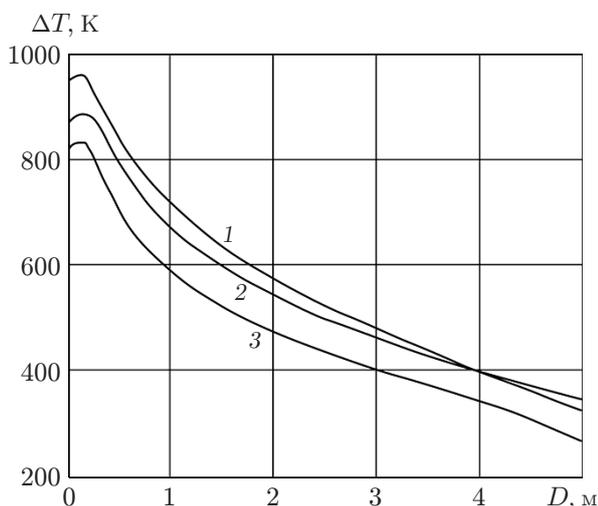


Рис. 6

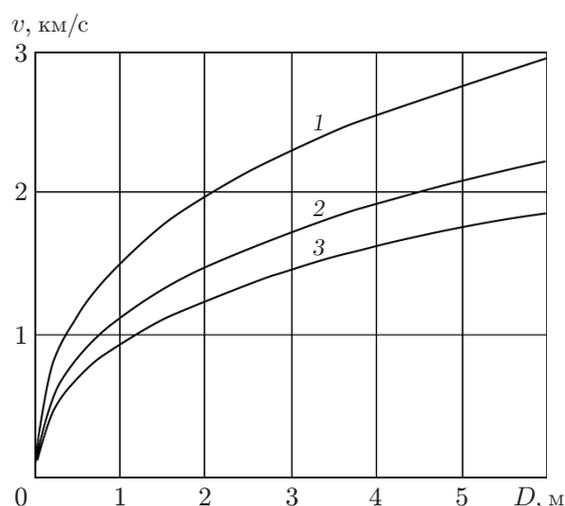


Рис. 7

Рис. 6. Максимальное увеличение температуры рельсов вдоль канала МРЭУ с тремя парами рельсов после шести выстрелов при различной массе снарядов: 1 — $M = 100$ г, 2 — $M = 200$ г, 3 — $M = 300$ г

Рис. 7. Зависимость скорости снарядов различной массы от пройденного расстояния:

1 — $M = 100$ г, 2 — $M = 200$ г, 3 — $M = 300$ г

300 г соответственно (рис. 7). На рис. 8 приведены соответствующие зависимости силы тока от времени. При уменьшении массы снарядов максимальная амплитуда полной силы тока в МРЭУ уменьшается за счет более быстрого движения снаряда и более быстрого увеличения индуктивности канала ускорителя, что приводит к меньшему нагреву рельсов.

На рис. 9 представлены результаты расчетов нагрева рельсов в МРЭУ для различных комбинаций материалов рельсов и якорей (Cu/Al, Fe/Cu, Fe/Al) после первого выстрела. Видно, что температура рельсов из железа и якорей из меди и алюминия (кривые 1, 2) больше температуры медных рельсов с алюминиевым якорем (кривая 3) при $D < 2$ м и $D < 1$ м соответственно. На начальном этапе ускорения значительно сильнее нагреваются рельсы из железа, что обусловлено малыми значениями тепло- и электропроводности

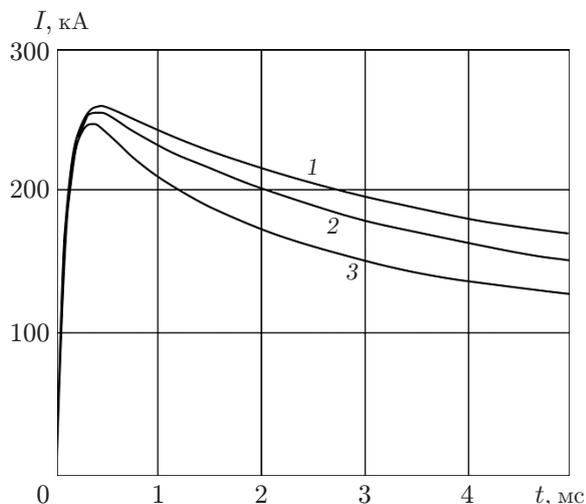


Рис. 8

Рис. 8. Зависимость силы тока в МРЭУ от времени для снарядов различной массы:

1 — $M = 100$ г, 2 — $M = 200$ г, 3 — $M = 300$ г

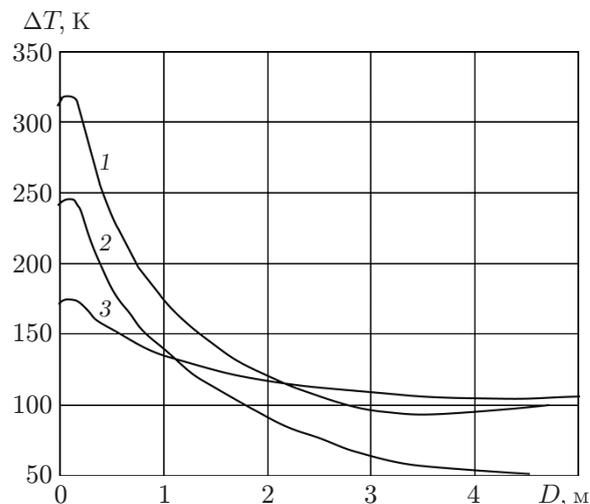


Рис. 9

Рис. 9. Максимальное увеличение температуры рельсов вдоль канала ускорителя для различных комбинаций материалов рельсов и якорей:

1 — железные рельсы и медные якоря, 2 — железные рельсы и алюминиевые якоря, 3 — медные рельсы и алюминиевые якоря

железа. Однако по мере увеличения скорости снаряда вследствие наличия скоростного скин-эффекта концентрация плотности тока в окрестности контактных границ рельсы — якоря в случае рельсов из железа становится меньше, чем в случае рельсов из меди, в результате чего рельсы из железа нагреваются меньше. Наименьший нагрев рельсов на больших расстояниях ($D > 1$ м) происходит при использовании железных рельсов и алюминиевых якорей. Полученные результаты позволяют предположить, что для якорей из алюминия использование на участке $D < 1$ м рельсов из меди, а на участке $D > 1$ м — рельсов из железа приведет к существенному уменьшению нагрева рельсов.

На рис. 10 представлены результаты расчета максимального увеличения температуры рельсов вдоль канала МРЭУ с пятью парами рельсов после пяти выстрелов для снарядов с якорями из алюминия и рельсов из меди. Предполагалось, что при ускорении снарядов массой 300 г используется один ИМГДГ (кривые 1), а при ускорении снарядов массой 500 и 800 г — два параллельно включенных ИМГДГ (кривые 2, 3). На рис. 11 приведена зависимость силы тока в МРЭУ от времени, на рис. 12 — зависимость скорости снаряда от расстояния D .

Заключение. В результате проведенного численного моделирования исследована возможность использования мощных ИМГДГ в качестве источника электропитания МРЭУ в высокоскорострельном режиме работы. Для МРЭУ с тремя парами рельсов показана возможность ускорения снарядов массой 100, 200, 300 г в канале длиной приблизительно 5 м до скоростей $v = 2,7; 2,2; 1,8$ км/с при скорости стрельбы $200 \div 250$ выстрелов в секунду. Максимальная температура нагрева рельсов при последовательном ускорении шести снарядов не превышает температуру плавления материала рельсов. Показано, что в режимах без плавления рельсов для МРЭУ с пятью парами рельсов, запитываемого от одного ИМГДГ, при последовательном ускорении пяти снарядов с алюминиевыми якоря-

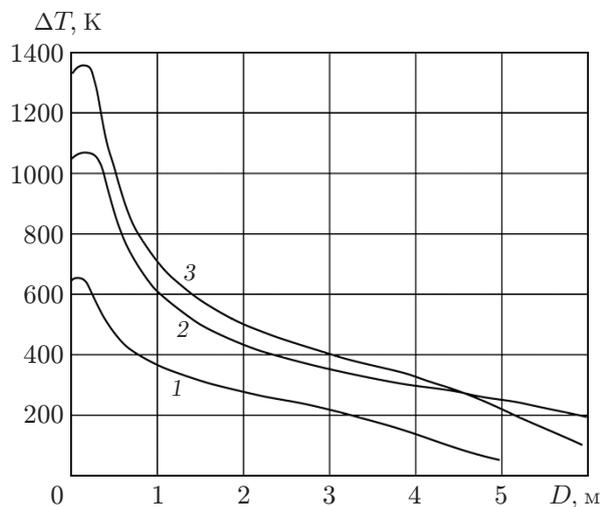


Рис. 10

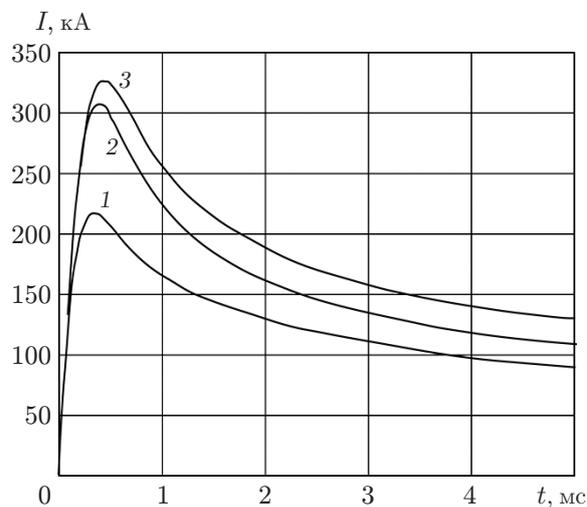


Рис. 11

Рис. 10. Максимальное увеличение температуры рельсов вдоль канала ускорителя с пятью парами рельсов после пяти выстрелов при различных количестве генераторов и массе снарядов:

1 — один генератор, 2, 3 — два генератора; 1 — $M = 300$ г, 2 — $M = 500$ г, 3 — $M = 800$ г

Рис. 11. Зависимость силы тока в МРЭУ с пятью парами рельсов от времени (обозначения те же, что на рис. 10)

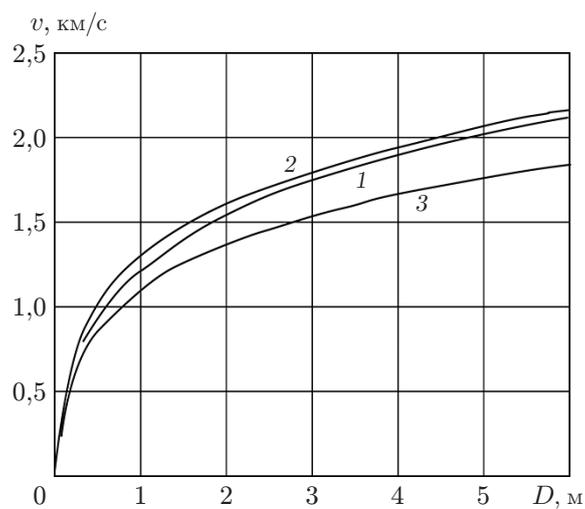


Рис. 12. Зависимость скорости снарядов в канале МРЭУ с пятью парами рельсов от расстояния D (обозначения те же, что на рис. 10)

ми на дистанции ускорения $D = 6$ м для снарядов массой 300 г может быть достигнута скорость $v = 2,2$ км/с. При использовании в качестве источника питания двух ИМГДГ в случае стрельбы очередью из пяти снарядов возможно ускорение снарядов массой 500 и 800 г до скоростей, равных 2,15 и 1,80 км/с соответственно. При этом скорость стрельбы может составлять $150 \div 200$ выстрелов в секунду.

Проведенные расчеты показали, что максимальный нагрев происходит в областях рельсов, расположенных вне канала ускорителя. Глубина области максимального нагрева на этих участках не превышает $1,5 \div 2,0$ мм. Можно предполагать, что и при стрельбе очередью из большего количества снарядов и плавлении рельсов на указанных участках работоспособность ствола МРЭУ будет сохраняться.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fair H. D.** The past, present and future of electromagnetic launch technology and the IEEE international EML symposia // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41, N 5. P. 1024–1027.
2. **McNab I. R.** Large-scale pulsed power opportunities and challenges // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42, N 5. P. 1118–1127.
3. **Башкатов Ю. Л., Орлов А. В., Стадниченко И. А. и др.** Исследование работы рельсотронного ускорителя твердых тел с питанием от взрывного МГД-генератора // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 22, № 3. С. 111–115.
4. **Narada Nob.** Space application of non-equilibrium MHD generator // Proc. of the 2nd Intern. workshop on magnetoplasma aerodynamics in aerospace applications, Moscow, 5–7 Apr. 2000. М.: Inst. High Temperatures RAN, 2000. P. 325–329.
5. **Синяев С. В., Буркин В. В., Пимонов Е. Ю.** Пути создания высокотемпового электродинамического ускорителя. Результаты экспериментальных и теоретических исследований // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. науч. конф. Волж. регион. центра РАН. Саров: Науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2000. С. 507–512.
6. **Велихов Е. П., Догадаев Р. В., Панченко В. П. и др.** Исследование свойств продуктов сгорания твердого (порохового) плазмообразующего топлива для импульсных МГД-генераторов // Докл. АН. 2010. Т. 433, № 2. С. 190–195.
7. **Афонин А. Г., Бутов В. Г., Панченко В. П. и др.** Анализ работы многорельсового электромагнитного ускорителя твердых тел с прямым питанием от импульсной магнито-гидродинамической установки // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 5. С. 91–101.
8. **Long G. C., Weldon W. F.** Limits to the velocity of solid armature in railgun // IEEE Trans. Magnetics. 1989. V. 25, N 1. P. 347–352.
9. **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.
10. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.

Поступила в редакцию 1/VI 2017 г.