

УДК 621.362:537.84

АНАЛИЗ РАБОТЫ МНОГОРЕЛЬСОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПРЯМЫМ ПИТАНИЕМ ОТ ИМПУЛЬСНОЙ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

А. Г. Афонин, В. Г. Бутов, В. П. Панченко*, С. В. Синяев,
В. А. Солоненко, Г. А. Швецов**, А. А. Якушев*

Институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, 634050 Томск, Россия

* Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,
142190 Троицк, Россия

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

E-mails: aag@niipmm.tsu.ru, bvg@niipmm.tsu.ru, panchvictor@gmail.com,
ssv@niipmm.tsu.ru, vik@niipmm.tsu.ru, shvetsov@hydro.nsc.ru, aayakushev@yandex.ru

Исследуется работа многорельсового электромагнитного ускорителя твердых тел с питанием от импульсного магнитогидродинамического (МГД) генератора. Рассматриваются особенности течения плазмы в канале импульсного МГД-генератора и возможности ускорения твердых тел при высокоскорострельном режиме работы ускорителя. Показано, что при согласованности динамики течения плазмы в канале импульсного МГД-генератора и условий метания такой режим работы ускорителя может быть реализован. Также показано, что мощные импульсные МГД-генераторы можно использовать в качестве источника электрической энергии для рельсовых электромагнитных высокоскорострельных ускорителей твердых тел, работающих в режиме “очередь”.

Ключевые слова: магнитогидродинамический генератор, многорельсовый ускоритель, циклическая нагрузка, математическая модель, совместный расчет, сверхзвуковое безударное течение, вольт-амперная характеристика, гистерезис.

DOI: 10.15372/PMTF20150507

Введение. Одной из ключевых проблем создания высокоскоростных электромагнитных ускорителей твердых тел является разработка специализированных источников электрической энергии [1–4] для ускорения как одиночных тел [4–6], так и нескольких последовательно движущихся тел [7–12]. В настоящее время экспериментально и расчетно-теоретически исследованы процессы ускорения твердых тел, имеющих различную массу, в широком диапазоне скоростей. Так, в работах [5, 6] рассматривается ускорение тел массой $10 \div 20$ кг до достижения скоростей $2,0 \div 2,5$ км/с. В [7] представлены результаты модельных экспериментов и предложена структурная схема высокоскорострельного элект-

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 2382).

© Афонин А. Г., Бутов В. Г., Панченко В. П., Синяев С. В.,
Солоненко В. А., Швецов Г. А., Якушев А. А., 2015

тродинамического ускорителя. В [8–10] изложена концепция высокоскорострельной рельсовой пушки и приведены результаты экспериментов по последовательному ускорению до скорости 750 м/с двух и трех тел с одинаковой массой 140 г. В работе [11] описаны эксперименты по последовательному ускорению тел массой 140 г до скорости 2400 м/с. Для данного ускорителя [11] с использованием метода численного моделирования показана возможность метания нескольких тел со скоростями $1200 \div 2400$ м/с при скорости стрельбы $75 \div 300$ выстрелов в секунду. В [12, 13] приведены результаты экспериментов по ускорению тел массой 500 г до скоростей свыше 1,5 км/с, а также предложены способы реализации режима работы ускорителя со скоростью 10 выстрелов в минуту для снарядов массой 100 г при скорости 1,5 км/с.

В работах [5–13] в качестве источника электропитания ускорителей использовались или рассматривались конденсаторные батареи, преимущество которых является относительная простота при эксплуатации. Однако низкие весогабаритные энергетические характеристики конденсаторов практически исключают создание на их основе мобильных, транспортабельных источников с энергией, составляющей несколько десятков или сотен мегаджоулей, необходимых для реализации перечисленных выше проектов. В [2] приведены характеристики различных импульсных источников электромагнитной энергии, способных обеспечить указанный диапазон энергий: конденсаторов, индуктивных и инерционных накопителей, электрохимических батарей, взрывомагнитных и магнитогидродинамических (МГД) генераторов, работающих на ракетном топливе. Однако особенности влияния характеристик перечисленных источников энергии на работу рельсовых ускорителей твердых тел не рассматривались.

Известно, что мощность МГД-генераторов импульсного и кратковременного действия на основе ракетных двигателей может достигать нескольких тысяч мегаватт [14]. Импульсные МГД-генераторы, работающие на ракетном топливе, являются компактными автономными источниками энергии с удельными энергетическими характеристиками, во много раз превышающими удельные энергетические характеристики конденсаторов, причем время их запуска и выхода на рабочий режим не превышает нескольких секунд. Экспериментальные характеристики самого мощного в мире МГД-генератора “Сахалин” [15, 16] и проектные параметры МГД-установки, состоящей из двух таких МГД-генераторов, позволяют рассматривать их в качестве источника прямого электропитания электромагнитных ускорителей нескольких типов (скорострельные рельсовые пушки, многорельсовые ускорители и др.) и катапульта [17–19].

При электропитании от МГД-генератора циклически меняющейся во времени активно-индуктивной нагрузки сверхзвуковое течение равновесной плазмы в МГД-канале и электрические характеристики МГД-генератора меняются [20]. Вследствие этого возникает задача определения устойчивости течения в МГД-канале и изменения характеристик электротехнической системы МГД-генератор — многорельсовый электромагнитный ускоритель. Для решения данной задачи необходимо разработать адекватную математическую модель рассматриваемой системы и провести численное исследование режимов ее работы.

В настоящей работе изучаются возможности использования импульсных МГД-генераторов (ИМГДГ) в качестве источника прямого электропитания многорельсового электромагнитного ускорителя (МРЭУ) с высокой скоростью метания твердых тел в режиме “очередь”. Необходимым условием применения такого генератора являются устойчивость его электрических характеристик и эффективность генерирования электроэнергии, обусловленные наличием непрерывного (безударного) сверхзвукового течения в МГД-канале в условиях циклически меняющихся во времени индуктивности L и активного сопротивления R нагрузки, представляющей собой высокоскорострельный ускоритель метаемых тел.

В проведенном исследовании использовались экспериментальные данные, полученные при испытаниях ИМГДГ “Сахалин”.

1. Постановка задачи. На рис. 1 приведена схема моделируемого устройства, в котором МРЭУ с металлическим якорем [21] напрямую запитан от установки, состоящей из двух параллельно включенных ИМГДГ.

Основными элементами устройства являются ИМГДГ и подключаемый к ним с помощью быстродействующего ключа К многорельсовый ускоритель с последовательно ускоряемыми в нем телами. Рельсовый блок состоит из нескольких пар рельсовых направляющих, разделенных вставками-изоляторами и последовательно соединенными электропроводящими перемычками во входном сечении ускорителя. Якорь метаемого тела состоит из нескольких одинаковых изолированных друг от друга металлических скоб с двумя периферийными токосъемными частями. Каждая скоба якоря замыкает соответствующую пару рельсовых направляющих ускорителя.

Ускоряемые тела подаются в канал МРЭУ последовательно, перед входом в рельсовый блок они предварительно разгоняются в составе единой сборки [7]. Перед вылетом из ускорителя якорь каждого тела практически обесточивается вследствие перехвата тока якорем каждого следующего метаемого тела, которое подается в ускоритель до вылета из

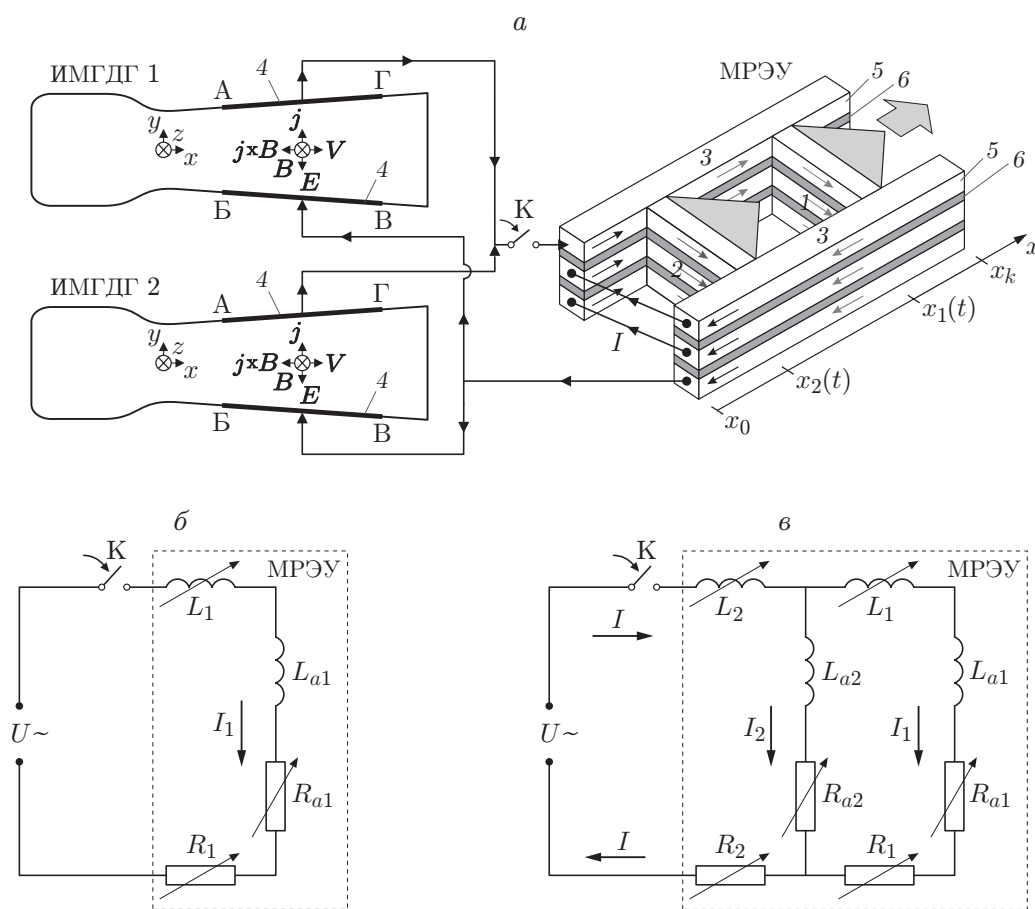


Рис. 1. Схема устройства с прямым питанием ускорителя от ИМГДГ (а), а также схемы электрической цепи при ускорении одного тела (б) и одновременном ускорении двух тел (в):

1, 2 — метаемые тела, 3 — многорельсовый ускоритель, 4 — токосъемные электроды, 5 — проводники, 6 — вставки-изоляторы; стрелки — направление тока

него предыдущего тела. Таким образом, имеет место чередование режимов ускорения, при которых в канале МРЭУ ускоряется либо одно, либо одновременно два тела. Электрические схемы установки для этих двух режимов представлены на рис. 1, б, в соответственно. Первое ускоряемое тело подается в канал ускорителя при работе ИМГДГ в режиме холостого хода.

Для ИМГДГ высокоскорострельный ускоритель представляет собой активно-индуктивную нагрузку с циклически изменяющимися электротехническими параметрами. Для исследования влияния такой нагрузки на режим сверхзвукового течения в канале ИМГДГ и его выходные характеристики разработана нестационарная квазидвумерная модель рассматриваемого устройства.

1.1. *Модель течения в газодинамическом тракте МГД-генератора.* Движение электропроводящего двухфазного рабочего тела в канале МГД-генератора моделируется в нестационарном квазидвумерном приближении идеального “псевдогаза” [22] с осреднением по координате z , направленной вдоль магнитного поля $\mathbf{B}(0, 0, B_z)$ (см. рис. 1, а).

Рассматриваемое течение описывается системой уравнений

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{K} + \mathbf{S}, \quad (1)$$

$$p = (\gamma - 1)\rho\varepsilon, \quad e = \rho[\varepsilon + 0,5(u^2 + v^2)], \quad \varepsilon = C_V T,$$

где

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ j_y B_z \\ j_x B_z \\ \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\rho u \, d \ln a / dx \\ -\rho u^2 \, d \ln a / dx \\ -\rho uv \, d \ln a / dx \\ -(e + p)u \, d \ln a / dx \end{bmatrix}.$$

Здесь наличие векторного слагаемого \mathbf{S} обусловлено расширением канала МГД-генератора вдоль оси Oz ; t — время; x, y, z — декартовы координаты; p, ρ, T — давление, плотность и температура рабочего газа соответственно; γ — показатель адиабаты; ε — внутренняя энергия единицы объема газа; u, v — продольная и поперечная составляющие вектора скорости \mathbf{V} ; e — полная энергия в единице объема газа; $a = a(x)$ — полуширина канала между его изолирующими стенками; j_x, j_y — продольная и поперечная составляющие вектора плотности тока \mathbf{j} ; B_z — индукция магнитного поля; \mathbf{E} — напряженность электрического поля.

В рамках полуэмпирического подхода [20] для учета влияния индуцированного магнитного поля целесообразно использовать экспериментально полученный профиль магнитной индукции в канале. На рис. 2 показано распределение суммарной магнитной индукции (кривая 1), нормированной на ее максимальное значение $B_0 = 2,2$ Тл. Кривые 2, 3 описывают зависимости расстояний между электродными стенками b и изолирующими стенками $2a$ канала, отнесенных к ширине канала $h = 1,8$ м между его электродными стенками в выходном сечении расчетной области, от координаты x . Входной границей расчетной области является сечение с координатой $x = 1,12$ м. Значения параметров на входной границе определяются в приближении квазиодномерного изоэнтропического течения в сопле. Необходимые для их определения значения давления и температуры в камере сгорания составляют 4,76 МПа и 3750 К соответственно. Параметры плазмы в камере задаются

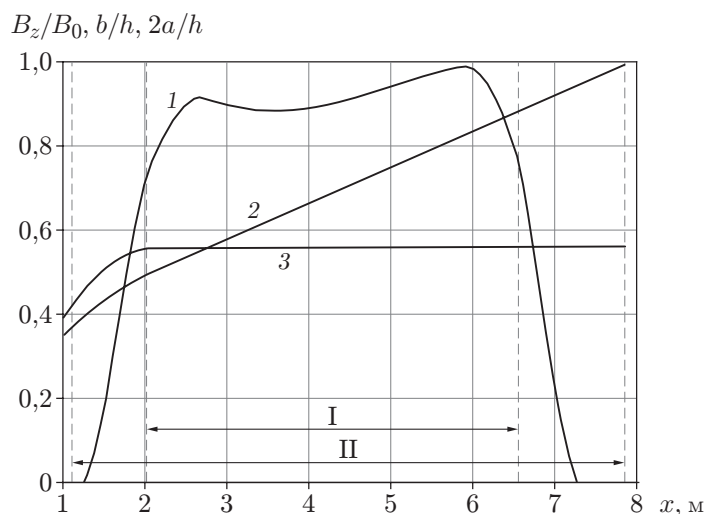


Рис. 2. Распределения нормированных значений индукции магнитного поля и расстояний между электродными и изолирующими стенками канала вдоль его оси для ИМГДГ “Сахалин”:
 1 — $B_z(x)/B_0$, 2 — $b(x)/h$, 3 — $2a(x)/h$; I — электродная зона, II — расчетная область

с учетом протекания равновесных химических реакций на разгонном участке газодинамического тракта ИМГДГ. Массовая доля конденсированной фазы в потоке составляет 0,35. Эффективные значения показателя адиабаты и газовой постоянной для рабочего тела (“псевдогаза”) равны соответственно 1,16 и 238 Дж/(кг · К) [23].

Поскольку теплофизические свойства течения в сверхзвуковой области меняются незначительно, они полагаются постоянными. При этом на входе в расчетную область параметры потока имеют следующие значения: $p = 0,682$ МПа, $T = 2917$ К, $|\mathbf{V}| = 1734$ м/с.

Расчет течения в ИМГДГ проводится в сверхзвуковой части его газодинамического тракта. На входе в расчетную область, где течение является полностью сверхзвуковым, задаются значения всех газодинамических и теплофизических параметров. На выходной границе, где течение также полагается сверхзвуковым, при численной реализации используются “мягкие” граничные условия

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0.$$

На стенках канала задается условие непротекания газа $V_n = 0$, где V_n — нормальная составляющая вектора скорости газа по отношению к внутренним поверхностям стенок.

1.2. *Электродинамические соотношения для канала МГД-генератора.* Электродинамика ИМГДГ описывается системой уравнений Максвелла и обобщенным законом Ома:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \text{div } \mathbf{j} = 0, \quad \mathbf{j} + \frac{\beta}{|\mathbf{B}|} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = \sigma[\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}], \quad (2)$$

где σ — электропроводность газа; β — параметр Холла.

При работе ИМГДГ на постоянную нагрузку используется стационарная форма уравнения электромагнитной индукции $\text{rot } \mathbf{E} = 0$. Для того чтобы оценить возможность и условия применения такого приближения при работе МГД-генератора на переменную циклическую нагрузку, исходное уравнение из системы (2) запишем в форме уравнения магнитной индукции, заменив параметр \mathbf{E} его значением из обобщенного закона Ома в (2):

$$\frac{1}{\mu\sigma} \text{rot} (\text{rot } \mathbf{B}) - \text{rot} [\mathbf{u} \times \mathbf{B}] + \frac{\beta}{|\mathbf{B}|} \text{rot} [\text{rot } \mathbf{B} \times \mathbf{B}] = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}.$$

Отношение характерных значений $\partial \mathbf{B} / \partial t$ и диффузионного слагаемого $(\mu\sigma)^{-1} \text{rot}(\text{rot } \mathbf{B})$ представляет собой магнитное число Струхалия Sh_m :

$$\text{Sh}_m = \left| \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right|_* / \left| \frac{1}{\mu\sigma} \text{rot}(\text{rot } \mathbf{B}) \right|_* = \frac{B_*}{\tau_*} / \left(\frac{1}{\mu\sigma_*} \frac{B_*}{l_*^2} \right) = \frac{\mu\sigma_* l_*^2}{\tau_*}. \quad (3)$$

В (3) индекс “*” обозначает характерные значения соответствующих величин: l_* — характерное расстояние, на котором изменяется профиль магнитной индукции в МГД-канале генератора (см. рис. 2); τ_* — характерное время изменения магнитного поля, обусловленное циклическим изменением (L, R) -нагрузки. Принимая в качестве τ_* длительность цикла, конкретизируем значение Sh_m при условии, что время цикла изменения нагрузки и время пролета плазмы через МГД-канал:

$$\tau_* = L_*/u_* \quad (4)$$

(L_* — длина канала МГД-генератора; u_* — средняя скорость плазмы в канале) согласуются. С учетом (4) число Струхалия из (3) находится по формуле

$$\text{Sh}_m = \text{Re}_m (l_*/L_*)^2,$$

где $\text{Re}_m = \mu\sigma_* u_* L_*$ — магнитное число Рейнольдса для МГД-канала. Для ИМГДГ “Сахалин” $\text{Re}_m \approx 0,5$, $L_* = 4,5$ м, а из рис. 2 (кривая 2) следует, что $l_* \approx 0,5 \div 1,0$ м. Тогда $\text{Sh}_m \approx 0,005 \div 0,025 \ll 1$, что указывает на допустимость применения стационарного приближения $\text{rot } \mathbf{E} = 0$ для расчета течения в канале МГД-генератора “Сахалин” в режимах с длительностью цикла изменения нагрузки, сопоставимой по порядку величины с временем пролета плазмы через МГД-канал генератора. В этом случае с использованием выражения для электрического потенциала $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$ уравнения (2) преобразуются в выражение

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial (\lambda\beta)}{\partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial (\lambda\beta)}{\partial x} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} [\lambda B_z (v + \beta u)] + \frac{\partial}{\partial y} [\lambda B_z (\beta v - u)], \quad \lambda = \frac{\sigma}{1 + \beta^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

из решения которого определяются компоненты вектора \mathbf{K} , входящего в систему (1). В (5) σ — электропроводность плазмы; β — параметр Холла [14]:

$$\begin{aligned} \sigma = \sigma_1 \left(\frac{p_1}{p} \right)^{0,5} \left(\frac{T}{T_1} \right)^{0,75} \exp \left[\frac{I_e}{2} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right) \right], \\ \beta = \mu_e |\mathbf{B}|, \quad \mu_e = \mu_{e1} \frac{p_1}{p} \left(\frac{T}{T_1} \right)^{0,5}, \quad \sigma_1 = \sigma(p_1, T_1), \quad \mu_{e1} = \mu_e(p_1, T_1). \end{aligned}$$

Здесь μ_e — подвижность электронов; I_e — потенциал ионизации; индекс 1 соответствует значениям параметров на входе в МГД-канал [23]: $p_1 = 0,328$ МПа, $T_1 = 2710$ К, $\sigma_1 = 44,8$ См/м, $\mu_{e1} = 0,187$ Тл⁻¹.

Граничными условиями для уравнения (3) на непроводящих участках стенок газодинамического тракта являются условия непротекания электрического тока $j_n = 0$. На электродах задаются нестационарные граничные условия

$$\varphi_a = -0,5U(t), \quad \varphi_c = 0,5U(t),$$

где $U(t)$ — напряжение на входе в рельсовый ускоритель. На входной и выходной границах расчетной области используется условие $\partial\varphi/\partial x = 0$.

1.3. *Модель рельсового электромагнитного ускорителя.* Модель работы ускорителя построена при следующих упрощающих предположениях: ток распределяется равномерно

по поперечным сечениям рельсов; удельное электрическое сопротивление материала рельсов линейно зависит от температуры [24]; влиянием теплопроводности в рельсах и теплоотдачей в окружающую среду в процессе работы ускорителя можно пренебречь; электрические контакты якорей с направляющими рельсами являются бездуговыми; расчет индуктивности рельсов проводится в квазистационарном приближении с использованием метода конечных прямоугольных элементов с однородно распределенным током [25], являющегося обобщением метода, предложенного в работе [26].

Системы электротехнических и теплофизических уравнений, описывающие ускорение одного (см. рис. 1, б) и одновременное ускорение двух (см. рис. 1, в) тел в канале ускорителя, соответственно имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= \frac{U - (R_{a1} + R_1 + \varkappa u_1)I_1}{L_{a1} + L_1}, & \frac{dR_1}{dt} &= Au_1\eta_1 + CI_1^2R_1, & \frac{\partial \ln \eta_1}{\partial t} &= CI_1^2, \\ \frac{du_1}{dt} &= \frac{\varkappa I_1^2}{2m_1}, & T(x, t) &= T_0 + \frac{1}{\beta_T} \left(\frac{\eta(x, t)}{\eta_0} - 1 \right), & L_1(t) &= \varkappa[x_1(t) - x_0]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} L_2 \frac{dI_1}{dt} + (L_2 + L_{a2}) \frac{dI_2}{dt} &= U - (R_2 + \varkappa u_2)(I_1 + I_2) - R_{a2}I_2, \\ (L_1 + L_{a1}) \frac{dI_1}{dt} - L_{a2} \frac{dI_2}{dt} &= R_{a2}I_2 - [R_1 + R_{a1} + \varkappa(u_1 - u_2)]I_1, \\ \frac{dR_1}{dt} &= A(u_1\eta_1 - u_2\eta_2) + CI_1^2R_1, & \frac{dR_2}{dt} &= Au_2\eta_2 + C(I_1 + I_2)^2R_2, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \ln \eta_1}{\partial t} \right|_{[x_2, x_1]} &= CI_1^2, & \left. \frac{\partial \ln \eta_2}{\partial t} \right|_{[x_0, x_2]} &= C(I_1 + I_2)^2, & \frac{du_1}{dt} &= \frac{\varkappa I_1^2}{2m_1}, & \frac{du_2}{dt} &= \frac{\varkappa I_2(2I_1 + I_2)}{2m_2}, \\ T(x, t) &= T_0 + \frac{1}{\beta_T} \left(\frac{\eta(x, t)}{\eta_0} - 1 \right), & L_1(t) &= \varkappa[x_1(t) - x_2(t)], & L_2(t) &= \varkappa[x_2(t) - x_0]. \end{aligned}$$

Здесь t — время; x — продольная координата; $x_1(t)$, $x_2(t)$ — координаты якорей в рельсовом блоке ($x_1 > x_2$); $R_1(t)$, $L_1(t)$, $R_2(t)$, $L_2(t)$ — сопротивление и индуктивность участков $[x_2, x_1]$ и $[x_0, x_2]$ ускорителя; R_a , L_a — сопротивление и индуктивность якорей; $I_1(t)$, $I_2(t)$ — сила тока, проходящего через якоря; \varkappa — погонная индуктивность ускорителя; $u_1(t)$, $u_2(t)$ — скорости тел; $\eta(t)$ — удельное электрическое сопротивление материала рельсов; η_1 , η_2 — значения $\eta(t)$ в зонах скользящего контакта с соответствующим якорем; m_i — масса i -го тела; $T(x, t)$ — распределение температуры вдоль рельсов; T_0 — начальная температура рельсов; $\eta_0 = \eta(T_0)$; β_T — температурный коэффициент материала рельсов; $A = 2n/s$; n — число пар рельсов в рельсовом блоке; $C = \eta_0\beta_T/(cs^2)$; c — теплоемкость единицы объема материала рельсов; s — площадь поперечного сечения каждого рельса; индекс 1 в (7) соответствует предыдущему ускоряемому телу в очереди, а 2 — последующему. После вылета из ускорителя тела 1 его индекс переходит к следующему за ним телу 2.

2. Метод численного решения. Для численного решения системы уравнений (1), описывающей течение в канале ИМГДГ, используется явная двухшаговая разностная схема Маккормака, а для решения систем уравнений электрической цепи ускорителя (6), (7) — метод Эйлера с пересчетом. Уравнение (5) решается с помощью метода конечных объемов.

Расчеты течения в канале ИМГДГ и ускорения тел в МРЭУ осуществляются одновременно. Для этого на каждом шаге по времени используется итерационная процедура определения на электродах генератора электрического напряжения, при котором получаемая из (1) сила полного тока, проходящего через токосъемные электроды, равна силе тока, определяемой из решения электротехнических уравнений (6), (7).

3. Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 3–5 приведены результаты расчета при следующих параметрах установки: питание МРЭУ осуществляется напрямую от двух параллельно включенных ИМГДГ, длина рельсов равна 5,5 м, число пар рельсов $n = 5$, $\kappa = 14,47$ мкГн/м, $s = 8$ см², количество тел в очереди — 10, их массы равны $m_1 = 550$ г, $m_2 = m_3 = \dots = m_9 = 470$ г, $m_{10} = 850$ г, начальная скорость $u_0 = 50$ м/с.

На рис. 3 показаны циклические изменения основных характеристик установки ИМГДГ-МРЭУ. Из приведенных на рис. 3,а зависимостей следует, что каждый следующий якорь выполняет функцию динамического “кроубара” [24], практически обесточивая предыдущий якорь к моменту его вылета из ускорителя. При ускорении 2–9-го тел изменение напряжения на нагрузке составляет порядка 1 кВ (см. рис. 3,в). При метании 1-го и 10-го (последнего) тел напряжения изменяются на 2,2 и 2,0 кВ соответственно. Мощность каждого МГД-генератора достигает приблизительно 500 МВт, или 83 % максимального значения (см. рис. 3,б). Ускорение каждого метаемого тела происходит практически в одном режиме со скоростью 470 выстрелов в секунду (см. рис. 3,г). Стабилизация режимов ускорения первого и последнего тел в очереди достигается за счет увеличения их массы. Начальное расстояние между последовательно ускоренными телами на выходе из ускорителя составляет приблизительно 4 м. Количество метаемых тел в очереди лимитируется предельно допустимой температурой рельсовых направляющих ускорителя.

На рис. 4,а показаны соответствующие изменения давления в четырех характерных точках МГД-канала: на входе (А, Б) и выходе (Г, В) анода и катода соответственно (см. рис. 1,а). В течение всего процесса давление во входном сечении электродной зоны выше давления в ее выходном сечении, что указывает на безударный режим течения в МГД-канале [20]. На рис. 4,б приведены результаты расчета давления в МГД-канале в момент прохождения максимального тока через второй якорь. Подобное распределение давления в МГД-канале характерно для всего процесса ускорения, что также свидетельствует о безударном режиме сверхзвукового течения и, следовательно, об устойчивости его выходных характеристик при работе на рассматриваемую циклическую нагрузку. При периодиче-

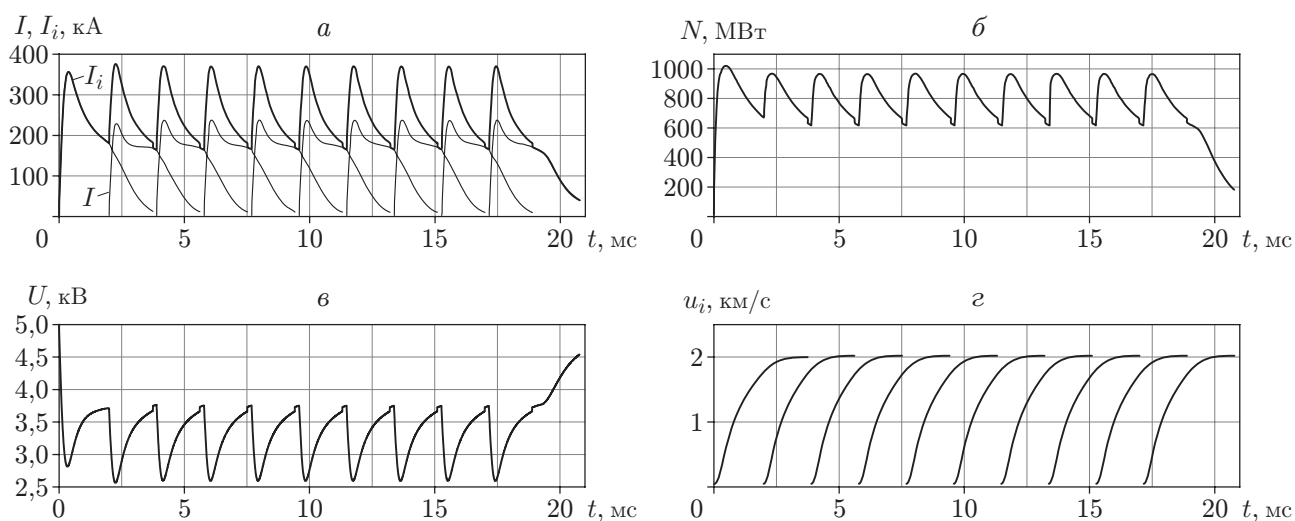


Рис. 3. Расчетные характеристики процесса последовательного ускорения 10 метаемых тел:

а — суммарный разрядный ток I в ИМГДГ и токи I_i через якоря; б — суммарная выходная мощность МГД-генераторов; в — напряжения на электродах; г — скорости метаемых тел

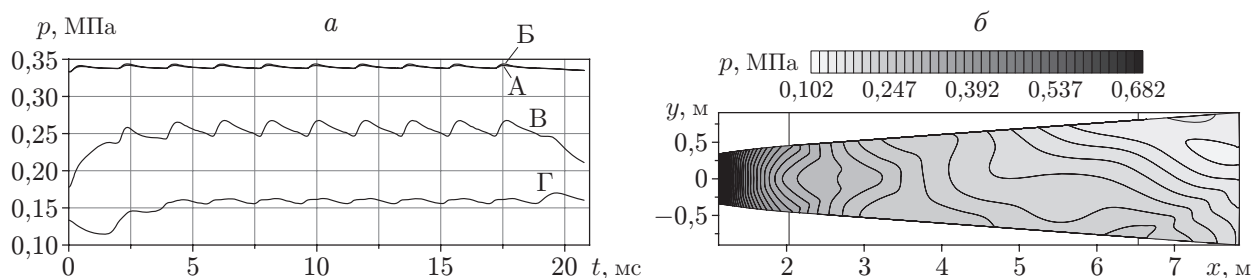


Рис. 4. Зависимость давления в четырех характерных точках А, Б, В, Г МГД-канала от времени (а) и распределение давления в МГД-канале в момент прохождения максимального тока через второй якорь в очереди (б)

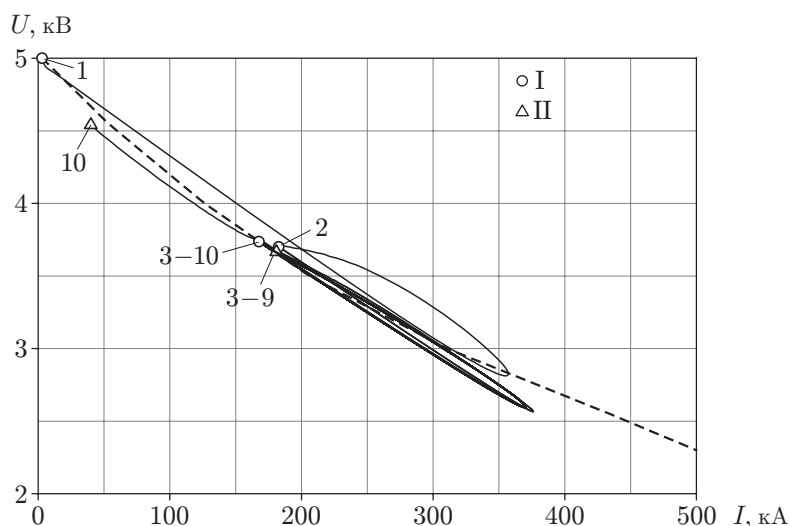


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики МГД-установки, состоящей из двух ИМГДГ: штриховая линия — при работе на постоянные активные нагрузки, сплошная — при работе на МРЭУ в режиме высокоскоростной очереди; I — на входе в ускоритель, II — на выходе из ускорителя; 1–10 — метаемые тела

ском увеличении (L, R)-параметров нагрузки вследствие наличия электромагнитного поля торможение потока замедляется, что в свою очередь препятствует образованию волн сжатия и ударных волн в канале генератора.

На рис. 5 приведены вольт-амперные характеристики МГД-установки, работающей на циклическую (МРЭУ в режиме “очередь”) и постоянную активную нагрузки. При электропитании ускорителя эти характеристики имеют гистерезисные особенности, обусловленные циклическим изменением параметров нагрузки $L(t), R(t)$. Термином “гистерезис” обозначается несовпадение вольт-амперных характеристик генератора для каждого рассмотренного цикла ускорения 10 метаемых тел. Наибольшие “гистерезисные” отклонения вольт-амперных характеристик от стационарной характеристики соответствуют переходным процессам в работе ускорителя, а именно ускорению 1-го тела в режиме выхода МГД-установки из состояния холостого хода, а также ускорению последнего (10-го) тела, когда перехвата тока якорем следующего тела не происходит. При рассмотренном режиме подачи тел в рельсовый блок вольт-амперные характеристики ускорителя в целом стабильно воспроизводятся при каждом цикле работы и незначительно отличаются от стационарной характеристики при работе на постоянную активную нагрузку.

Заключение. Сформулирована и решена задача расчета совместной работы МГД-установки (суммарная мощность приближенно равна 1 ГВт), состоящей из двух ИМГДГ “Сахалин”, и бездугового многорельсового ускорителя с циклически изменяющимися сопротивлением и индуктивностью.

Установлено, что при выполнении условия согласования параметров сверхзвукового течения в канале МГД-генератора и параметров метания циклический режим работы ускорителя не приводит к развитию отрывных течений в МГД-канале и качественному изменению электрических характеристик МГД-генератора.

Впервые показана возможность реализации режима высокоскоростной очереди из 10 метаемых тел с частотой $400 \div 500$ выстрелов в секунду при стабильно воспроизводимых динамических характеристиках в каждом цикле работы установки.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования мощных ИМГДГ в качестве источника электропитания импульсных высокоскорострельных ускорителей твердых тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fair H. D.** The past, present and future of electromagnetics 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. **Швецов Г. А., Титов В. М., Башкатов Ю. Л. и др.** Исследование работы рельсотронного ускорителя твердых тел с питанием от взрывного МГД-генератора // *Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 13–17 июня 1983 г.* М.: Наука, 1984. С. 177–182.
4. **Harada 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. **Ellis R. L., Poynor J. C., McGlasson B. T., Smith A. N.** Influence of Bore and rail geometry on an electromagnetic naval railgun system // *IEEE Trans. Magn.* 2005. V. 41, N 1. P. 182–187.
6. **Zizhou Su, Tao Zhang, Honghai Zhang, et al.** Design and simulation of a large muzzle kinetic energy railgun // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2013. V. 41, N 5. P. 1416–1420.
7. **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.
8. **Schneider M., Wötzel M., Wenning W.** The ISL rapid fire railgun project RAFIRA. Pt 2. First results // *IEEE Trans. Magn.* 2009. V. 45, N 1. P. 448–452.
9. **Schupper Ch., Alonahabi F., Schneider M.** Electromechanical aspects of reliable loading procedures for multishot railguns // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2013. V. 41, N 5. P. 1387–1391.
10. **Vincent G., Hundertmark St.** Using the hexagonal segmented railgun in multishot mode with three projectiles // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2013. V. 41, N 5. P. 1431–1435.
11. **Gallant J., Vancaeyzeele T., Luawens B., et al.** Design consideration for an electromagnetic railgun firing intelligent bursts to be used against anti-ship missiles // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015. V. 43, N 5. P. 1179–1184.

12. **Mehlhorn T.** National security research in plasma physics and pulsed power: Past, present and future // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42, N 5. P. 1088–1117.
13. **Annual Report** / Naval Research Laboratory. Plasma Physics Division. S. 1., 2013. P. 1–80. [Electron. resource]. Режим доступа: www.ppd.nrl.navy.mil.
14. **Роза Р.** Магнитогидродинамическое преобразование энергии. М.: Мир, 1970.
15. **Велихов Е. П., Матвеев О. Г., Панченко В. П. и др.** Импульсная МГД-установка “Сахалин” электрической мощностью 500 МВт на твердом пороховом топливе // Докл. РАН. 2000. Т. 370. С. 617–622.
16. **Velikhov E. P., Pismenny V. D., Matveenko O. G., et al.** Pulsed MHD power system “Sakhalin” — the world largest solid propellant fueled MHD generator of 500 MWe electric power output // Proc. of the 13th Intern. conf. on magnetohydrodynamics power generation and high temperature technologies, Beijing (China), 12–15 Oct., 1999. Beijing: S. n., 1999. V. 2. P. 387–398.
17. **Babakov Y. Y., Plekhanov A. V., Zheleznyi V. B.** Range and railgun development results at LS&PA “SOYUZ” // IEEE Trans. Magn. 1995. V. 31, N 1. P. 259–263.
18. **Fulghum D. A.** Russian power design to drive U.S. weapons // Aviat. Week Space Technol. 1995. 10 Apr. P. 54.
19. **Batenin V. M., Biturin V. A., Ivanov G. S., et al.** Advanced reusable space transportation system with horizontal launch of air-space plane // Proc. of the 2nd Workshop on magneto-plasma-aerodynamics in aerospace applications, Moscow, 5–7 Apr. 2000. М.: Inst. High Temperatures RAS, 2000. P. 318–325.
20. **Бреев В. В.** Сверхзвуковые МГД-генераторы / В. В. Бреев, А. В. Губарев, В. П. Панченко. М.: Энергоатомиздат, 1988.
21. **Poltanov A. E., Kondratenko A. K., Glinov A. P., Ryndin V. N.** Multi-turn railguns: The concept analysis and experiments // IEEE Trans. Magn. 2001. V. 37, N 1. P. 457–461.
22. **Бутов В. Г., Галкин В. М., Головизин В. М. и др.** Численное моделирование пространственных двухфазных течений в сверхзвуковых МГД-генераторах. М., 1990. (Препр. / Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова; № 5276/16).
23. **Panchenko V. P.** Preliminary analysis of the “Sakhalin” world largest pulsed MHD generator // Proc. of the 4th Intern. workshop on magnetoplasma aerodynamics in aerospace applications, Moscow, 9–11 Apr. 2002. М.: Inst. High Temperatures RAS, 2002. P. 322–331.
24. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
25. **Синяев С. В.** Метод расчета силовых и электромагнитных параметров сложных систем проводников в задачах электродинамики // Тез. докл. 3-го Сиб. конгресса по прикладной и индустриальной математике, Новосибирск, 22–27 июня 1998 г. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. Ч. 3. С. 40.
26. **Honjo R. T., Del Vechio R. M.** A program to compute magnetic fields and inductances due to solid rectangular conductors arbitrarily positioned in space // IEEE Trans. Magn. 1986. V. 22, N 5. P. 1532–1535.

Поступила в редакцию 9/XII 2014 г.